



생산자료 분석기법을 이용한 셰일가스정 생산거동 연구

이선민 · 정지현 · 신창훈* · †권순일

동아대학교 에너지·자원공학과, *한국가스공사 연구개발원
(2013년 6월 14일 접수, 2013년 8월 16일 수정, 2013년 8월 16일 채택)

Study on Production Performance of Shale Gas Reservoir using Production Data Analysis

Sun-Min Lee · Ji-Hun Jung · Chang-Hoon Sin* · †Sun-Il Kwon

Dept. of Energy & Mineral Resources Engineering, Dong-A University,
Busan 604-714, Korea

*R&D Division, Korea Gas Corporation, Gyeonggi-do 426-860, Korea
(Received June 14, 2013; Revised August 16, 2013; Accepted August 16, 2013)

요약

본 연구에서는 캐나다 셰일가스전에 위치한 2개의 생산정에 대해 생산특성에 따라 적절한 생산자료 분석기법을 이용하여 분석을 수행하였다. Case A 생산정의 경우 생산자료가 매우 가변적으로 나타나 시간과 중첩시간을 적용하여 비교분석을 실시하였다. 유동영역을 구분하기 위해 생산자료를 로그-로그 그래프에 도시한 결과 천이 유동구간만 나타났다. 시간과 중첩시간을 적용하여 자극을 받은 저류층 면적이 각각 180, 240 acres로 산출되었고, 원시가스부존량은 15, 20 Bscf로 계산되었다. 그러나 산출된 저류층 면적은 경제영향유동자료로부터 산출된 것이 아니기 때문에 최소 값으로 판단된다. 이에 저류층 면적과 감퇴지수에 대한 생산성 예측을 수행하였다. 그 결과 감퇴지수가 0.5, 1로 커질수록 궁극가채량이 1.2배와 1.4배로 증가하였다. 또한 저류층 면적이 240에서 360 acres로 커지면 궁극가채량이 1.3배 증가되는 것을 확인할 수 있었다. Case B의 고압 저류층에 위치한 생산정은 상부지층압에 따른 지층압축률과 투과도를 적용하여 분석하였다. 지역학적 영향을 적용한 경우와 아닌 경우를 비교한 결과, 저류층 면적은 1.4배, 원시가스부존량 1.5배로 증가하였다. 셰일 가스전 현장자료에 대한 분석 결과, 분석 방법에 따라 원시가스부존량, 궁극가채량 등 향후 생산성 예측이 크게 달라지므로 생산자료에 따라 유사시간, 중첩시간, 지역학적 분석 등의 적절한 분석방법을 적용하여야 정확한 생산자료 분석이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract - This paper presents production data analysis for two production wells located in the shale gas field, Canada, with the proper analysis method according to each production performance characteristics. In the case A production well, the analysis was performed by applying both time and superposition time because the production history has high variation. Firstly, the flow regimes were classified with a log-log plot, and as a result, only the transient flow was appeared. Then the area of simulated reservoir volume (SRV) analyzed based on flowing material balance plot was calculated to 180 acres of time, and 240 acres of superposition time. And the original gas in place (OGIP) also was estimated to 15, 20 Bscf, respectively. However, as the area of SRV was not analyzed with the boundary dominated flow data, it was regarded as the minimum one. Therefore, the production forecasting was conducted according to variation of b exponent and the area of SRV. As a result, estimated ultimate recovery (EUR) increased 1.2 and 1.4 times respectively depending on b exponent, which was 0.5 and 1. In addition, as the area of SRV increased from 240 to 360 acres, EUR increased 1.3 times.

†Corresponding author: sikwon@dau.ac.kr

In the case B production well, the formation compressibility and permeability depending on the overburden were applied to the analysis of the overpressured reservoir. In comparison of the case that applied geo-mechanical factors and the case that did not, the area of SRV was increased 1.4 times, OGIP was increased 1.5 times respectively. As a result of analysis, the prediction of future productivity including OGIP and EUR may be quite different depending on the analysis method. Thus, it was found that proper analysis methods, such as pseudo-time, superposition time, geomechanical factors, need to be applied depending on the production data to gain accurate results.

Key words : shale gas, production data analysis, flowing material balance, square root time, production forecasting, stimulated reservoir volume

I. 서 론

최근 전세계적으로 각광받고 있는 셰일가스는 수압파쇄와 수평정 시추 기술의 발전으로 경제성이 높아지고 다른 지역대비 상대적으로 가스 시장과 가까우며 판매를 위한 파이프라인 등 인프라가 잘 발달되어 있다. 그래서 북미지역을 중심으로 생산이 급격히 증가하고 있다[1].

가스전은 생산 초기에 위치와 시간에 따라 일정하지 않는 저류층압력 강하가 일어나는 천이유동이 나타나고 이후 영향반경이 외곽경계에 도달하게 되어 저류층 압력이 일정하게 강하되는 저류층 경계 효과가 반영된 유동 (boundary dominated flow)의 경향이 나타난다. 전통 가스전의 경우 표준곡선을 이용하여 천이유동 영역에서 저류층의 물성을 산출할 수 있고[2], Arps의 경험식[3]을 적용하여 생산감퇴곡선 분석을 통해 생산추이를 분석하고 부존량을 예측할 수 있다. 그러나 천이유동기간이 수일로 매우 짧게 나타나 자료가 부족하고 정확한 저류층 물성을 산출하는 것이 어려워 유정시험을 통해 저류층 물성을 산출한다. 이에 반해 셰일가스전은 투과도가 낮아 천이유동 기간이 몇 달에서 몇 년으로 길게 나타나기 때문에 미세탄성파탐사 (microseismic), DFIT (diagnostic fracturing injection test)기법, 생산자료 분석기법 등을 통하여 저류층 물성을 산출할 수 있다.

이 중, 생산자료 분석기법은 셰일가스정의 생산자료인 압력과 생산량 등을 이용해 생산추이에 맞춰 저류층의 물성 뿐만 아니라 궁극기체량을 도출할 수 있으며, 이를 시뮬레이션 해석 결과와 비교 분석하여 보다 정확한 생산성 예측이 가능하다. 하지만 생산자료 분석시 가변적인 생산자료와 지역학적 영향으로 현장자료의 해석이 복잡하다. 또한 대부분의 생산 초기 가스정이 천이유동 상태에 있어 경계유동 자료를 통해 산출되는 부존량과 균열특성에 대한 정확한

해석이 어렵다. 따라서 저 투과성 매질의 특성과 수압파쇄로 인해 발생된 균열의 영향으로 인하여 전통적인 가스정과 상이한 셰일가스전 생산자료 분석기법에 대한 연구가 필수적이다.

Palacio와 Blasingame은 기존 연구와 달리 유사압력에 따른 정규화된 생산량 (normalized rate)과 물질평형시간 (material balance time)을 이용하여 생산자료 분석을 수행하였다[4]. 이후 Mattar와 McNeil은 유동물질평형법 (flowing material balance, FMB)으로 원시가스부존량을 산출하는 방법을 제시하였다[5]. Ibrahim과 Wattenbarger은 치밀가스 생산시 천이유동기간에서 선형유동식을 이용하여 선형유동인자 (linear flow parameter, LFP)와 원시가스부존량을 수학적으로 분석하는 방법을 제시하였다[6]. Kupchenko 등 (2008)은 Arps의 경험식을 적용하여 천이유동 영역에서 감퇴지수값이 4인 이중선형유동 (bilinear flow), 감퇴지수값이 2인 선형유동 (linear flow), 그리고 감퇴지수값이 증가하는 유사방사형유동 (pseudo-radial flow)으로 정리하였고, 저류층 경계 효과가 반영된 유동에서 감퇴지수가 0.5이하로 나타남을 제시하였다[7].

이에 본 연구에서는 먼저 연구동향 분석을 통해 생산거동 특성을 조사하고 이를 해석할 수 있는 다양한 기법들을 분석하여 생산자료 분석기법을 확립하였다. 또한 이 기법을 현장 생산자료에 적용하여 유동패턴, 저류층 물성, 자극을 받은 저류층 면적, 원시가스부존량 등을 도출하였고 이를 바탕으로 향후 생산거동을 예측하는 연구를 수행하였다.

II. 생산자료 분석 방법

가스전 생산자료 분석은 생산거동 분석기법과 생산거동 예측기법으로 나눌 수 있다. 생산거동 분석기법은 특정 그래프를 이용하여 유동영역에 따라 저

류층 물성 및 원시가스부존량을 도출하는데 사용된다. 생산거동 예측기법은 생산추이를 분석하여 궁극가채량 (estimated ultimate recovery, EUR)을 산출할 수 있다.

먼저, 생산자료 분석을 실행하기 전에 생산량, 공저압력, 초기압력, 저류층의 공극률, 두께, 온도, 유정완결 등의 기본적인 정보가 필요하다. 또한 자료를 분석하기에 앞서 생산량과 압력, 시간을 그래프로 도시한 다음 운영상의 이이나 기계의 결함으로 생산자료의 변화가 크게 발생하는 구간은 생산자료를 재조정하여 분석을 실시할 필요가 있다.

세일가스전의 생산자료 분석을 위하여 다음과 같은 분석방법을 적용할 수 있다(Table 1).

- (1) 로그-로그 그래프 분석법 (log-log plot)
- (2) 시간 제곱근 그래프 분석법 (square root time plot)
- (3) 유동물질평형 그래프 분석법 (flowing material balance plot)
- (4) 생산거동 예측 그래프 분석기법 (forecast plot)
- (5) 지역학적 저류층 분석법 (geomechanical reservoir analysis)

2.1. 로그-로그 그래프 분석법

세일가스 생산자료를 로그-로그 그래프에 적용하여 유동영역을 구분할 수 있다. 이는 생산자료 분석시 운영과정에서 생산량 변동 폭이 크거나 생산량과 압력에서 특이치값이 발생하는 경우 이를 구분할 때 중요한 역할을 한다. 로그-로그 그래프 분석방법을 살펴보면 y축에는 유사압력 (pseudo-pressure)에 따른 정규화된 생산량과 도함수, x축에는 시간, 유사시간 (pseudo-time), 물질평형유사시간 또는 중첩시간 (superposition time)을 로그-로그 그래프로 도시하여 분석한다.

$$\frac{q}{p_{pi} - p_{pwf}}, \left[\frac{d}{dnt} \left(\frac{p_{pi} - p_{pwf}}{q} \right) \right]^{-1} \text{ versus } t \tag{1}$$

$$\frac{q}{p_{pi} - p_{pwf}}, \left[\frac{d}{dnt_a} \left(\frac{p_{pi} - p_{pwf}}{q} \right) \right]^{-1} \text{ versus } t_a = \int_0^t \frac{1}{\mu c_t} dt \tag{2}$$

$$\frac{q}{p_{pi} - p_{pwf}}, \left[\frac{d}{dnt_{ca}} \left(\frac{p_{pi} - p_{pwf}}{q} \right) \right]^{-1} \text{ versus } t_{ca} = \frac{(\mu_g c_g)_i}{q_g} \int_0^t \frac{q_g}{\mu_g c_g} dt \tag{3}$$

$$\frac{q}{p_{pi} - p_{pwf}}, \left[\frac{d}{dnt_n} \left(\frac{p_{pi} - p_{pwf}}{q} \right) \right]^{-1} \text{ versus } t_n = \sum_{j=1}^n \frac{q_j - q_{j-1}}{q_n} \sqrt{t - t_{j-1}} \tag{4}$$

식 (1)은 가장 기본적으로 사용되며, 식 (2)는 생산정 압력이 거의 일정할 때 사용된다. 로그-로그 그래프가 중첩되는 성향을 보이지 않고 운영조건이 크게 바뀌는 경우에 식 (3)이 사용된다. 또한 식 (4)는 비전통 저류층의 선형유동 분석시 가장 특화된 식으로 생산량의 변동이 심한 경우 적용된다. 유동영역 분석시 각각의 축값을 적용하여 생산량의 도함수값이 그래프에 도식화되어 직선으로 나타났을 때 가장 정확하게 분석이 가능하다.

Anderson 등은 세일가스전 선형유동에서 유정손상지수가 포함되기 때문에 해석이 어렵지만 생산량 미분곡선으로 도식화하였을 경우 유정손상지수가 영향을 미치지 않아 파쇄된 세일가스 저류층을 해석하는데 있어서 유용하다고 발표하였다[8]. 즉, 생산량 미분곡선은 선형유동 시 기울기가 1/2로 유지되기 때문에 유동양상을 구분할 수 있는 지표가 될 수 있다. 이를 통하여 1차 선형유동이 나타나는 구간은 기울기가 1/2인 직선의 형태로 나타나고 경계영향유동이 발생하는 구간은 기울기가 1인 직선으로 나타난다. 또한 자극을 받지 않은 저류층에서 자극을 받은 저류층 (Stimulated reservoir volume : SRV)내로 유동이 발생하면 2차 선형유동이 일어나 기울기가 1/2인 직선의 형태로 나타남을 알 수 있다(Fig. 1).

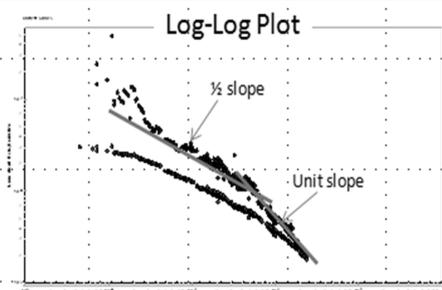
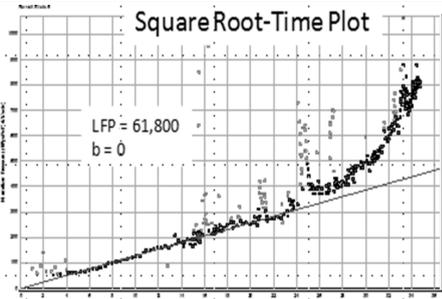
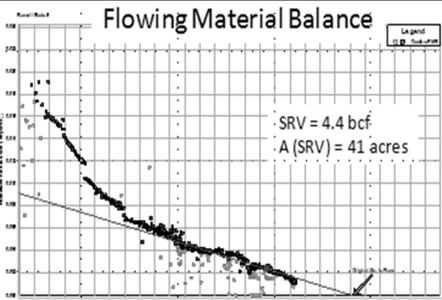
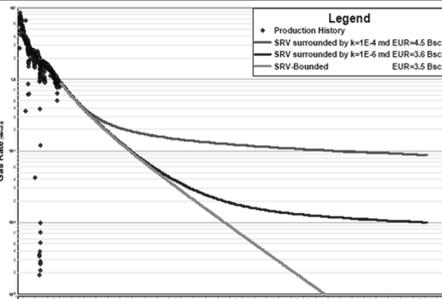
2.2. 시간 제곱근 그래프 분석법

세일가스 저류층에서 일반적으로 천이유동이 길게 일어나기 때문에 y축은 생산량에 따른 정규화된 유사압력, x축은 시간 제곱근 또는 중첩시간 제곱근인 시간 제곱근 그래프는 세일가스 생산거동을 분석할 때 가장 중요한 단계이다. 천이유동은 시간 제곱근 그래프에서 직선으로 나타난다. 때문에 로그-로그 그래프 분석방법과의 비교를 통하여 상호보완적으로 선형유동 구간을 구분할 수 있다.

$$\frac{p_{pi} - p_{pwf}}{q} \text{ versus } \sqrt{t} \tag{5}$$

$$\frac{p_{pi} - p_{pwf}}{q} \text{ versus } \sqrt{t_n} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{q_j - q_{j-1}}{q_n} \sqrt{t - t_{j-1}}} \tag{6}$$

Table 1. Summary of methodology for production data analysis[8]

Log-log plot	
 <p style="text-align: center;">Log-Log Plot</p>	<p>Normalized rate, Derivative vs. Time, Pseudo time, Material balance pseudo time, or Superposition time</p> <ul style="list-style-type: none"> - Flow regime identification 1/2 slope : linear flow (transient flow) Unit slope : Pseudo-steady state flow (boundary dominated flow)
Square root time plot	
 <p style="text-align: center;">Square Root-Time Plot</p>	<p>Normalized pressure vs. Square root time or Superposition time</p> <ul style="list-style-type: none"> - Linear flow analysis $A\sqrt{k}$ (Linear flow parameter), apparent skin
Flowing material balance plot	
 <p style="text-align: center;">Flowing Material Balance</p>	<p>Normalized rate vs. Normalized gas cumulative production</p> <ul style="list-style-type: none"> - Boundary dominated flow analysis OGIP, A_{SRV}, x_f, k
Forecast plot	
 <p style="text-align: center;">Legend</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Production History — SRV surrounded by $k=1E-4$ md EUR=4.5 Bscf — SRV surrounded by $k=1E-6$ md EUR=3.6 Bscf — SRV-Bounded EUR=3.5 Bscf 	<p>Gas rate vs. Time (Semi-log or Log-log)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Empirical method EUR (Arps equation)

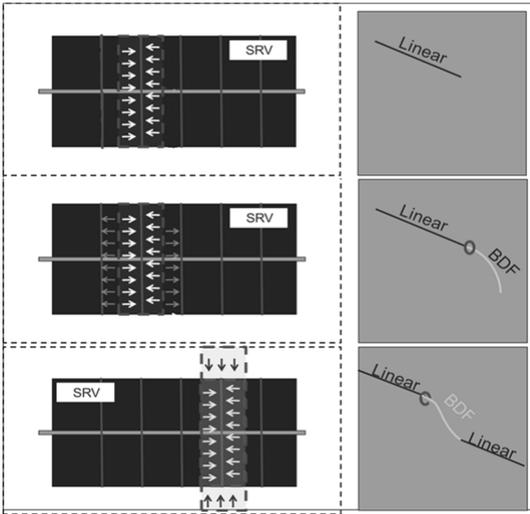


Fig. 1. The flow trend in multi stage hydraulic fractured shale and tight gas well[9].

로그-로그 그래프와 마찬가지로 식 (5)를 그래프에 도식화하였을 때 특이값들이 중첩되어 분석이 어려울 경우 식 (6)을 사용하면 정확한 분석이 가능하다. 수압파쇄로 인하여 자극을 받은 셰일가스 저류층에서 천이유동은 몇 년 동안 일어난다. 셰일가스 정에서는 수압파쇄로 인해 생성된 균열대내로 가스가 생산될 때 그 유동의 형태가 단순화되어 선형유동이 이루어진다고 가정한다.

시간 제곱근 그래프에서 나타나는 직선의 기울기 m 으로부터 선형유동인자를 식 (7)을 이용하여 산출할 수 있다.

$$LFP = A\sqrt{k} = \frac{630.8T}{m} \times \frac{1}{\sqrt{(\phi\mu_g c_t)_i}} \quad (7)$$

셰일가스전에서 일반적으로 적용되는 다단계 수압파쇄 수평정인 경우 균열과 셰일층을 포함한 평균 투과도는 식 (8)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$k = \left(\frac{LFP \times L}{xyh} \right)^2 = \left(\frac{LFP \times L}{A_{SRV} h} \right)^2 \quad (8)$$

그러나 이 식에서 y 인 균열 길이가 미지수이기 때문에 경계영향유동이 나타난다는 조건하에 유동물질평형 그래프에서 자극을 받은 저류층 면적 (A_{SRV})을 분석하여 산출해야 한다. 만일 경계영향유동이 나타나지 않으면 자극을 받은 저류층 면적은 미세탄

성파탐사를 통해서 산출할 수 있다.

인공균열 셰일가스 생산정에서 선형유동이 나타나는데 정호에서 역학적인 손상이 없을 때에도 유한 수리전도도의 균열로 인해 압력이 손실되어 유정손상지수가 나타나고 이는 생산성에 영향을 미친다. 셰일가스 생산정에서 유정손상지수는 시간제곱근 그래프에서 난류유동인자 (Non-darcy coefficient)를 포함한 유사유정손상지수의 형태로 산출할 수 있다. 유사유정손상지수는 시간제곱근 그래프를 근사한 직선의 y 축 절편값 (b')을 이용하여 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$s' = \frac{kh}{1417T} b' \quad (9)$$

2.3. 유동물질평형 그래프 분석법

셰일 가스정에서는 수압파쇄에 의해 형성된 균열 사이의 간섭으로 인해 경계영향유동이 나타난다. 이 유동영역 생산자료를 유동물질평형 그래프로 도시하여 자극을 받은 저류층 내에서 가스원시부존량을 산출할 수 있다.

유동물질평형 그래프의 y 축은 유사압력에 따른 정규화된 생산량, x 축은 유사압력에 따른 정규화된 누적생산량이다(식 (10)).

$$\frac{q}{p_{pi} - p_{pwf}} \text{ versus } \frac{2qt_{ca} p_{pi}}{(\mu_g c_{t,z})_i (p_{pi} - p_{pwf})} \quad (10)$$

유동물질평형 그래프에서 직선이 나타나면 그 선의 연장선이 x 축과 만나는 누적생산량이 원시가스부존량이 된다. 여기서 산출된 원시가스부존량을 이용하여 자극을 받은 저류층 면적을 계산할 수 있다(식 (11)).

$$A_{SRV} = \frac{OGIP \times B_{gi}}{\phi h s_g} \quad (11)$$

또한 자극을 받은 저류층 면적과 수평정 길이를 이용하여 균열 반 길이 (fracture half length)를 식 (12)와 같이 산출할 수 있다.

$$x_f = \frac{A_{SRV}}{2x} \quad (12)$$

2.4. 생산거동 예측분석기법

셰일가스 저류층에서는 Arps의 경험식을 토대로 생산량, 시간, 누적생산량 등으로 그래프를 도시하

여 생산추이를 분석하고 미래생산거동을 예측하여 궁극가채량을 도출할 수 있다. 셰일가스전은 투과도가 매우 낮아 천연유동영역의 감퇴지수값이 1~4 뿐만 아니라 5이상의 값이 나타나 쌍곡선감퇴방정식에서 감퇴지수값이 1을 초과하는 수를 적용한 초쌍곡선감퇴방정식 (superhyperbolic decline equation)을 사용하여 미래생산거동을 예측한다. 그리고 경계영향유동에서는 감퇴지수값이 0에서 1사이로 변하게 된다. 반면에 경계영향유동이 나타나지 않으면 감퇴지수와 자극을 받은 저류층 면적은 분석할 수 없기 때문에 민감도 분석을 위한 변수가 되고 다양한 시나리오에 대해 적절한 생산거동 예측분석이 필요하다.

2.5. 지역학적 저류층 분석법

셰일층은 입자크기가 작고 입자간의 배열이 치밀하여 상부지층압에 따른 공극 감소효과가 크게 일어난다. 따라서 지역학적 저류층 분석기법을 적용하여 시간과 압력에 따른 암석 물성의 변화를 분석해야한다. 즉 과압 저류층인 셰일가스전의 생산거동 분석시 추가적으로 보정된 공극률, 지층압축률 (공극압축률)과 투과도를 유동물질평형, 시간 제곱근 그래프분석방법에 적용하여 정확한 분석을 수행할 필요가 있다.

Dobrynin의 관계식은 순 상부지층압력 (net overburden pressure)의 범위 이상에서 상대적으로 변화되는 지층 압축률을 예측할 수 있다[10].

$$c_f = \frac{c_{fmax}}{\log\left(\frac{p_{max}}{p_{min}}\right)} \log\left(\frac{p_{max}}{p_n}\right) \quad (13)$$

III. 생산거동분석

본 연구에서는 생산자료 분석기법을 적용하여 셰일가스전 생산자료를 분석하였다. 분석에 활용한 자료는 캐나다 브리티시 콜롬비아주에 위치한 셰일가스전이다. 본 분석에서는 상용프로그램 중 비전통가스정 생산자료 분석에 특화된 Fekete 사의 “Harmony”를 사용하였다.

3.1. Case A

Case A 생산정의 생산자료 분석을 위해 Table 2와 같이 저류층과 가스 물성에 관한 정보와 Table 3, 4와 같은 케이싱, 튜빙 등과 같은 유정완결자료를 입력하였다. 이 생산정은 초기압력이 4,239 psia, 온도는 149 °F이며 17단계 수압파쇄기법을 적용한 수평

정이다.

Fig. 2와 같이 이 생산정은 2009년 6월에서 2012년 5월까지 생산되었다. 생산정에서 2010년 8월에 생산이 급감됨에 따라 압력이 회복되었지만, 생산량이 상대적으로 급격히 증진되지 않았다. 이후 생산량이 일정한 값으로 감소되면서 압력이 증가되었다. 이와 같이 생산자료 분석을 수행하기 전에 추후 분석시 영향을 줄 수 있는 생산이력에 대한 정보가 필요하다.

먼저, 유동영역을 규명하기 위해 Fig. 3(a)와 같이 로그-로그 그래프를 도시하였다. 그 결과, 생산량 미분곡선이 시간의 중첩으로 인한 특이치가 나타나 직선을 이용한 정확한 분석이 어려웠다. 그래서 Fig. 3(b)와 같이 x축에 물질평형유사시간을 적용하여 재분석을 실시한 결과, 1/2인 직선의 형태가 상대적으로 뚜렷하게 나타나 정확한 분석을 수행할 수 있었다. 분석결과, 생산이 3년정도 진행되었음에도 경계영향유동이 일어나지 않았음을 확인 할 수 있었다. 또한 생산초기에 약간의 곡선 형태가 나타난 것으로부터 유사유정손상지수값이 크게 산출될 것으로 예상할 수 있었다.

천이유동 추이를 분석하기위해 x축은 시간제곱근, y축은 생산량에 대해 정규화된 유사압력인 시간 제곱근 그래프를 도시하였다. 그 결과 Fig. 4(a)와 같이 직선의 경향에서 벗어나는 값들이 많아 x축에 중첩시간을 적용하였는데 Fig. 4(b)와 같이 직선의 경향이 뚜렷이 나타는 것을 확인하였다. 이 그래프에서 후반부에 기울기가 상승하는 곡선구간이 보이지 않는 것으로부터 다단계 수압파쇄시 균열간의 간섭으로 인한 경계영향유동이 일어나지 않았음을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

또한 선형유동구간을 분석한 결과 (a)에서 선형유동인자의 값이 $81,580 \sqrt{md} ft^2$ 이고 (b)에서는 $133,187 \sqrt{md} ft^2$ 이며 y축 절편의 값은 각각 $50(10^6 psi^2/cp)/MMscfd$ 와 $62(10^6 psi^2/cp)/MMscfd$ 로 산출되었다. 이는 x축의 변화로 인해 기울기가 급해져 선형유동인자값이 커져 나타난 현상으로 동일한 자료도 분석방법에 따라 그 결과가 차이를 나타내는 것을 알 수 있으며, 생산자료에 적절한 분석기법의 선택이 중요함을 다시 한번 확인할 수 있었다. 또한 여기서 산출된 선형유동인자는 투과도, 자극을 받은 저류층 부피의 면적을 산출하는데 사용되므로 이 값의 차이가 저류층 물성 산출에도 지속적으로 영향을 미치게 된다. 투과도와 유사유정손상지수는 유동물질평형 그래프 분석방법에서 자극을 받은 저류층 부피가 산출되어야 분석이 가능하기 때문에 유동물질평형 그래프 분석방법 이후에 산출하였다.

Table 2. Input data-reservoir and fluid properties (Case A)

Properties		Case A
Reservoir properties	Initial reservoir pressure	4,239 psia
	Reservoir temperature	149 °F
	Net pay	147.60 ft
	Wellbore radius	0.35 ft
	Total porosity	6 %
	Initial gas saturation	80 %
	Initial water saturation	20 %
	Formation compressibility	6.01×10^{-6} 1/psi
	Initial total compressibility	1.33×10^{-4} 1/psi
Gas property	Gas gravity	0.65
Gas composition	Carbon dioxide	0.20 %
	Hydrogen sulfide	0 %
	Nitrogen	0.5 %

Table 3. Input data-deviation survey (Case A)

Measured depth	TVD	Deviation angle
4,500.00 ft	4,500.00 ft	0°
10,695.50 ft	8573.30 ft	48.90°
14,383.20 ft	8573.30 ft	90.00°

Table 4. Input data-completion (Case A)

Wellbore		Case A
Casing data	MD top	0 ft
	MD bottom	14,383.20 ft
	I.D	4.67 in
Tubing data	MD bottom	10,777.50 ft
	I.D	1.995 in
	O.D	2.375 in
Perforated intervals	MD top	10,943.20 ft
	MD bottom	14,383.2 ft
	Middle perforated point	12,663.20 ft

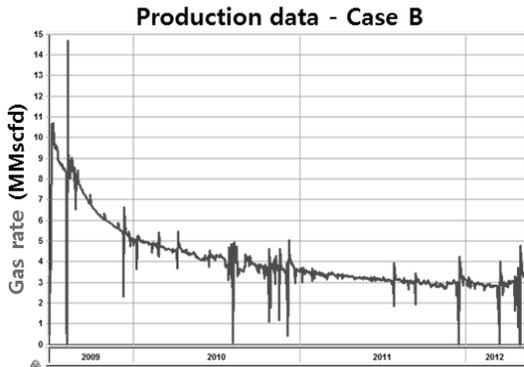


Fig. 2. Production data (Case A).

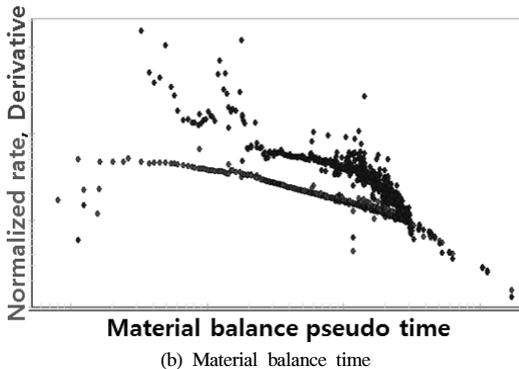
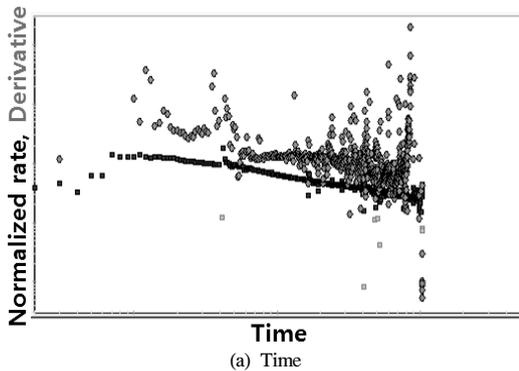


Fig. 3. Log-log plot (Case A).

Fig. 5와 같이 유동물질평형 그래프 분석방법을 적용하여 분석을 실시하였다. 분석 결과, 직선의 경향을 보이는 경계영향유동이 나타나지 않아 가장 마지막 생산자료가 천이유동이 끝나는 시점이라는 가정하에 분석을 실행하였다. Fig. 5(a)는 Fig. 4에서 시간 제곱근을 적용하였을 때와 연동되어 나타난 유동

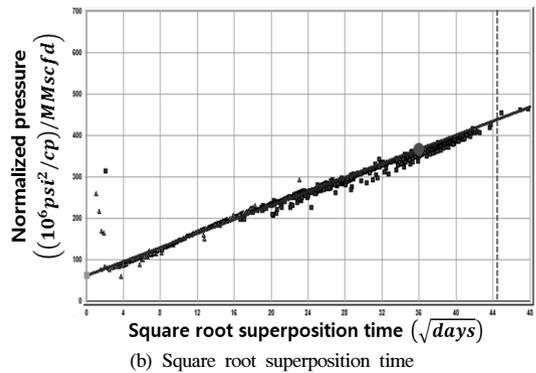
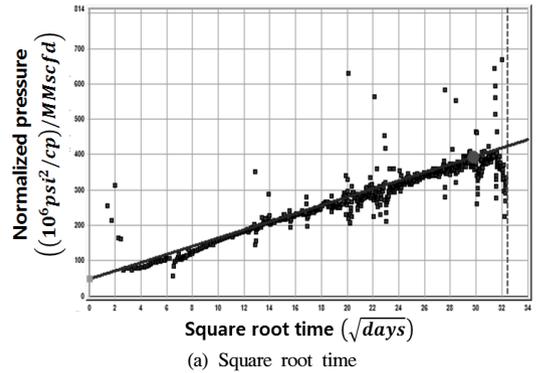
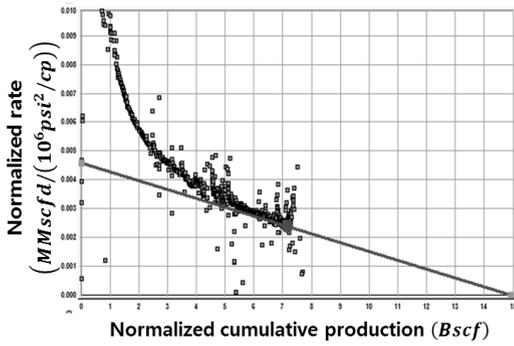


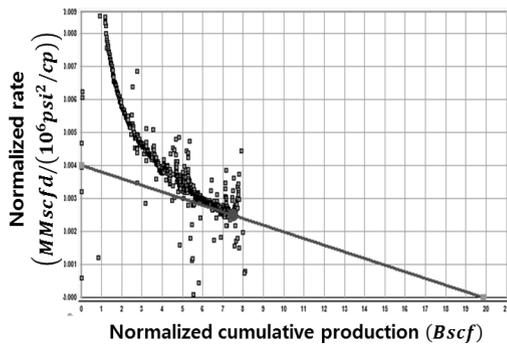
Fig. 4. Square root time plot (Case A).

물질평형 그래프로 원시가스부존량은 15 Bscf로 산출되었는데 이는 경계영향유동이 나타나지 않아 자극을 받은 저류층내의 최소 원시가스부존량으로 판단된다. 또한 (b)는 중첩시간을 적용하였을 때 그래프로 최소 원시가스부존량은 20 Bscf로 도출되었다. 원시가스부존량의 차이는 5 Bscf로 1.3배 증가되었는데 이는 천이유동이 끝나는 시점과 기울기가 변수로 사용되기 때문으로 정확한 분석방법의 선택이 중요함을 다시 한번 확인할 수 있었다.

산출된 원시가스부존량을 이용하여 자극을 받은 저류층의 최소 면적을 산출한 결과, 시간함수에 따라 각각 180 acres와 240 acres로 1.3배 증가되었다. 그리고 자극을 받은 저류층의 최소 면적값을 이용하여 산출된 균열 반 길이는 각각 1,065 ft와 1,417 ft였다. 여기서 계산된 균열 반 길이는 시추계획서 설계한 균열길이와 미세탄성과타사를 통해 구한 값과의 비교를 통해 천이유동이 끝나는 시점을 예측하는데 사용할 수 있다. 또한 이 유동물질평형 그래프 분석을 통해 산출한 투과도는 각각 0.0000583 md (58.3 nd)와 0.0000877 md (87.7 nd)로, 유사유정손상지수는 2.04×10^{-3} 과 3.80×10^{-3} 로 산출되었다.



(a) Square root time



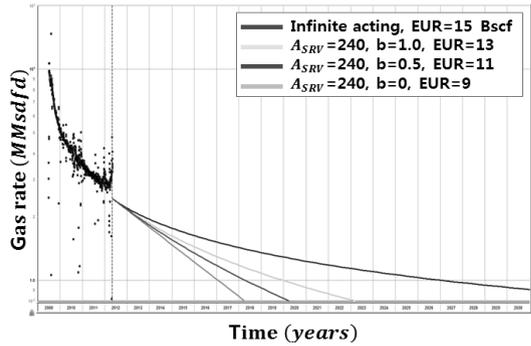
(b) square root superposition time

Fig. 5. Flowing material balance plot (Case A).

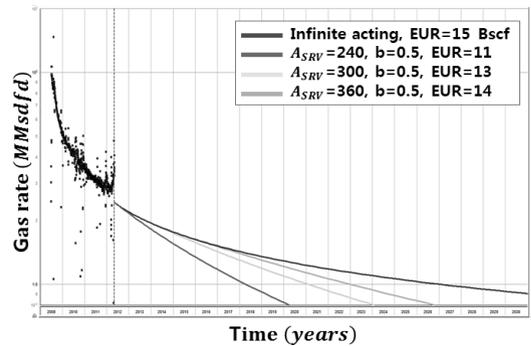
생산거동 예측기법을 이용하여 향후 생산성을 예측하였다. 경제성에 따른 최소 생산량은 216 Mscfd으로 설정하였고 천이유동 영역의 감퇴지수값을 2로 설정하여 분석하였다.

먼저 자극을 받은 최소 저류층 면적을 240 acres로 설정하고 생산종료시점부터 경제영향유동이 일어난다고 가정하여 감퇴지수가 0, 0.5, 1으로 변화됨에 따라 달라지는 궁극가채량에 대한 민감도분석을 실시하였다. Fig. 6(a)와 같이 감퇴지수값이 0일 때 궁극가채량이 9 Bscf이며 0.5일 때 11 Bscf, 1일 때 13 Bscf로 예측되었다. 감퇴지수가 커질수록 궁극가채량이 1.2배와 1.4배 증가하였다.

또한 Kupchenko 등이 제안한 저류층 경계 효과가 반영된 유동에서의 감퇴지수인 0.5를 마지막 생산시점 이후부터 적용하여 자극을 받은 저류층 면적에 따른 궁극가채량의 민감도분석을 실시하였다[7]. 이때 적용된 자극을 받은 저류층 면적은 균열길이와 수평정 길이를 이용하여 계산된다. 균열길이는 시추계획시 설계된 길이나 미세탄성파탐사를 이용한 측정 길이를 사용하지만 본 연구에서 설계자료나 측정



(a) Gas rates forecast by b value



(b) Gas rates forecast by SRV

Fig. 6. Production forecast (Case A).

자료가 없어, 최소 면적으로 산출된 240 acres을 기준에서 일정비율로 증가시키면서 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 6(b)와 같이 자극을 받은 저류층 면적이 240 acres일 때 궁극가채량이 11 Bscf이며 300 acres일 때 13 Bscf, 360 acres일 때 14 Bscf로 산출되었다. 자극을 받은 저류층 면적이 60, 120 acres로 커질수록 1.2배, 1.3배 증가하였다.

3.2. Case B

Case B 생산정은 저류층 초기압력이 5,143 psia, 온도는 149°F이며 17개의 다단계 수압파쇄기법을 적용한 수평정이다. 이 생산정은 초기압력과 유정안결 자료가 Table 5과 같고, 가스 물성은 지역적 불균질성이 크지 않기 때문에 인접한 Case A의 물성을 동일하게 사용하였다.

이 생산정은 2010년 12월에서 2012년 5월까지 생산되었다(Fig. 7). 2011년 2월에 생산을 중단시켜 이에 따라 압력이 회복되었지만 생산 재개시 이전의 압력보다 낮아져 또다시 생산을 중단시킨 것을 확인할 수 있었다.

Table 5. Input data-deviation survey (Case B)

Measured depth	TVD	Deviation angle
7,200.00 ft	7,200.00 ft	0°
8,973.10 ft	8,553.48 ft	40.20°
17,066.93 ft	8,553.48 ft	90.00°

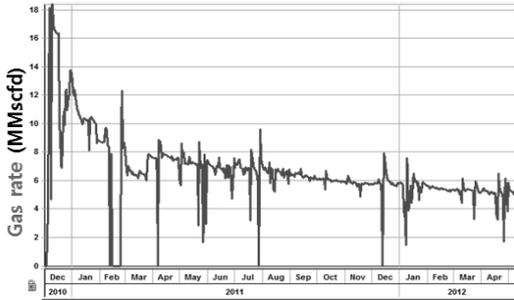


Fig. 7. Production data (Case B).

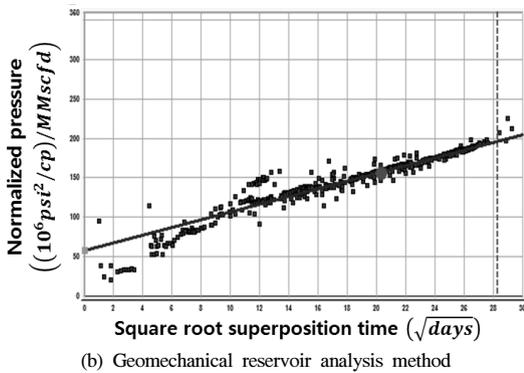
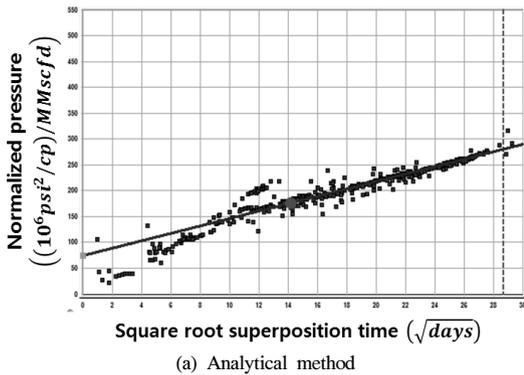


Fig. 8. Superposition root time plot (Case B).

유동영역을 규명하기 위해 증첩시간을 적용하여 로그-로그 그래프 분석을 수행한 결과, 저류층 경계 효과가 반영된 유동이 일어나지 않았음을 확인할 수 있었다.

Case B의 경우 초기 압력이 5,000 psia 이상인 과압저류층으로 지역학적 저류층 분석기법을 시간 제곱근 그래프 분석법과 물질평형 그래프 분석법에 적용하였다. 이때 저류층 물성 변화는 Dobrynin의 관계식과 Nur와 Yilmaz의 관계식을 이용하여 산출하였으며 지역학적 저류층 분석기법을 적용하지 않은 경우와 비교하였다.

천이유동의 추이를 분석하기 위해 x축에 증첩시간을 적용하여 시간 제곱근 그래프를 도시하였다. 이로부터 경계효과가 반영된 유동이 아직 일어나지 않음을 확인할 수 있었다 (Fig. 8). Fig. 8(a)에서 선형 유동인자는 $176,500 \sqrt{md}ft^2$, 상부지층압에 따른 지역학적 저류층 분석 기법을 적용한 Fig. 8(b)에서 선형유동인자는 $258,191 \sqrt{md}ft^2$ 으로 산출되었다. 이는 식 (13)의 Dobrynin 관계식을 이용해 보정된 지

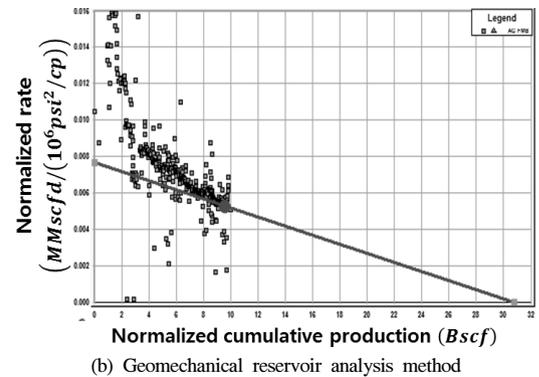
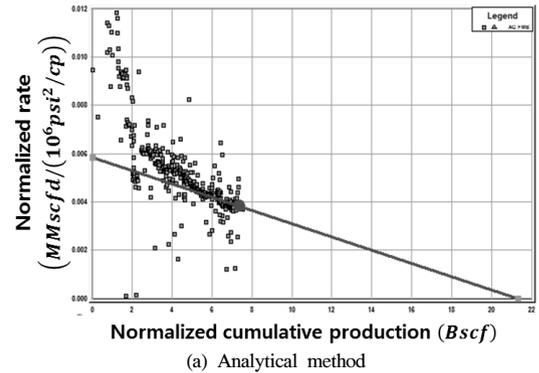


Fig. 9. Flowing material balance plot (Case B).

층압축률로 인하여 선형 기울기의 경사가 급해져 선형유동인자값이 커진 결과로 판단된다.

이 분석에서 y축 절편값은 지역학적 분석을 적용하지 않은 경우 80 ($10^6 \text{psi}^2/\text{cp}$)/MMscfd, 적용한 경우 55 ($10^6 \text{psi}^2/\text{cp}$)/MMscfd로 산출되었다.

Fig. 9는 가장 마지막 생산자료가 천이유동이 끝나는 시점이라는 가정하에 유동물질평형 그래프 분석방법을 적용하여 분석하였다.

Fig. 9(a)에서 자극을 받은 저류층의 최소 원시가스부존량이 21 Bscf로 산출되었고 지역학적 저류층 분석 기법을 적용한 Fig. 9(b)에서 31 Bscf로 도출되었다. 원시가스부존량의 차이는 10 Bscf로 1.5배 증가되었다. 이는 보정된 지층압축률로 인하여 시간제곱근 그래프에서 산출된 선형유동이 끝나는 시점과 기울기로 인한 차이로 분석 기법에 따라 다른 결과값이 산출됨을 확인하였다.

자극을 받은 저류층의 최소면적은 Fig. 9(a)에서 231 acres로 산출되었고, 지역학적 저류층 분석 기법을 적용한 최소 면적이 333 acres로 산출되었다. 또한 균열 반 길이는 각각 620 ft, 896 ft로 도출되었다.

마지막으로 이 생산장에서 산출된 투과도는 지역학적 분석을 적용하지 않은 경우 0.000813 md (813 nd), 적용한 경우 0.000835 md (835 nd)으로 거의 차이가 없었다. 유사유정손상지수는 각각 4.52×10^{-2} , 3.34×10^{-2} 로 매우 작게 산출되어 큰 영향이 없는 것으로 확인되었다.

IV. 결론

본 연구에서는 셰일가스장에서 나타나는 생산거동 특성에 따른 생산자료 분석기법을 확립하였다. 또한 상용소프트웨어를 활용하여 캐나다 셰일가스전에 위치한 2개의 생산정에 대해 현장생산자료를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 셰일가스전에서 생산거동 분석은 로그-로그 그래프에 적용하여 유동영역을 구분하고 시간 제곱근 그래프를 이용하여 천이유동구간을 분석하며 유동물질평형 그래프로 경계층 효과가 반영된 유동구간을 분석한다. 이러한 특정 그래프를 이용하여 유동영역에 따라 저류층 물질 및 원시가스부존량을 도출할 수 있다. 또한 생산거동 예측은 Arps의 경험식을 이용하여 궁극가체량을 산출하는 것으로 자극을 받은 저류층 면적과 감퇴지수는 민감도분석을 위한 변수가 되고 다양한 시나리오에 대한 적절한 생산추이를 예측할 수 있다.

(2) Case A의 경우 생산자료가 매우 가변적으로 나타나 시간과 중첩시간을 적용하여 비교분석을 실

시하였다. 유동영역을 구분하기 위해 로그-로그 그래프에 적용한 결과 천이유동구간만 나타났다. 시간과 중첩시간을 적용하여 자극을 받은 저류층 면적은 각각 180, 240 acres 산출되었고, 원시가스부존량은 15, 20 Bscf로 계산되었다. 즉, 이러한 유형의 생산정에서 정확한 분석을 위해서는 중첩시간의 적용이 필요하다라는 것을 확인하였다.

(3) Case B는 상부지층압에 따른 공극 감소효과로 인해 보정된 지층압축률과 투과도를 적용하여 분석을 수행하였다. 그 결과 자극을 받은 저류층 면적은 지역학적 분석기법을 적용하지 않은 경우 231 acres, 적용한 경우 333 acres로 산출되었고, 원시가스부존량은 각각 21 Bscf, 31 Bscf로 도출되었다. 따라서 지역학적 요소를 적용함으로써 더 정확한 분석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 셰일 가스전 현장자료에 대한 분석 결과, 분석 기법에 따라 투과도, 원시가스부존량, 궁극가체량 등이 다르게 산출되어 향후 생산성 평가 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 생산자료에 따라 유사시간, 중첩시간, 지역학적 요소 적용 등의 적절한 분석 방법을 적용하여야 정확한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

(5) 본 연구에서 분석된 생산자료는 경계유동 양상이 나타나지 않았기 때문에 FMB 결과는 최소값으로 산출되는 한계가 있다. 그러나 대부분의 셰일 가스장에서 천이유동 기간이 매우 길게 나타나므로, 다양한 측정 자료와의 통합 및 민감도 분석을 통해 미래 생산성을 예측할 필요가 있다.

감사의 글

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

사용기호

- A_{SRV} : 자극을 받은 저류층의 면적(ft^2)
- B_{gi} : 초기 가스용적인자[rcf/scf]
- c_i : 총등온압축률[psia^{-1}]
- h : 생산층 두께[ft]
- k : 투과도[md]
- L : 균열 간격[ft]
- m : 시간 제곱근 그래프에서 나타나는 직선의 기울기[$\text{psi}^2 \text{day}^{1/2}/\text{cp}/\text{Mscf}$]
- p_{pi} : 초기 유사압력[psi^2/cp]
- p_{pwf} : 유사유동압력[psi^2/cp]

q : 가스생산량 [Mscf/day]
 S_g : 가스 포화도[fraction]
 T : 저류층 온도[°R]
 t : 시간[days]
 t_a : 유사시간[days]
 t_{ca} : 물질평형유사시간[days]
 t_n : 중첩시간[days]
 x_f : 균열반길이[ft]
 y : 균열길이[ft]
 z : 가스압축인자[dimensionless]
 c_f : 저류층 압축률[psi⁻¹]
 c_g : 가스 압축률[psi⁻¹]

그리스 문자

ϕ : 저류층 공극률[fraction]
 μ_g : 가스 점성도[cp]

참고문헌

- [1] EIA(Energy Information Administration), "Annual Energy Outlook 2012" DOE, <http://www.eia.gov>, (2012)
- [2] Fetkovich, M.J., "Decline-Curve Analysis Using Type Curves", *SPE*, 32(6), 1065-1077, (1980)
- [3] Arps, J.J., "Analysis of Decline Curves", *A.I. M.E.*, 228-247, (1945)
- [4] Palacio, J.C. and Blasingame, T.A., "Decline Curve Analysis Using Type Curves Analysis of Gas Well Production Data", *Joint Rocky Mountain Regional and Low Permeability Reservoirs Symposium*, Denver, Colorado, (1993)
- [5] Mattar, L. and McNeil, R., "The 'flowing' Gas Material Balance", *Original Petroleum Society manuscript*, (1997)
- [6] Ibrahim, M. and Wattenbarger, R.A., "Analysis of Rate Dependence in Transient Linear Flow in Tight Gas Wells", *Petroleum Society's 6th Canadian International Petroleum Conference*, Calgary, Alberta, (2005)
- [7] Kupchnenko, C.L., Gault, B.W., and Mattar, L., "Tight Gas Production Performance Using Decline Curves", *CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference*, Calgary, Alberta, (2008)
- [8] Anderson, D.M., Nobakht, M., Mohadam, S., and Mattar, L., "Analysis of Production Data from Fractured Shale Gas Wells", *SPE Unconventional Gas Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania, (2010)
- [9] Fekete, "Unconventional Rate Transient Analysis in F.A.S.T. RTA", Software training course (2012)
- [10] Dobrynin, V.M., "Effect of Overburden Pressure on Some Properties Of Sandstones", *SPE*, 2(4), 360-366, (1962)