



셰일가스정 천이유동 생산자료분석의 기술적 고려사항

한동권 · †권순일

동아대학교 에너지자원공학과

(2015년 11월 6일 접수, 2016년 1월 14일 수정, 2015년 1월 16일 채택)

Technical Consideration for Production Data Analysis with Transient Flow Data on Shale Gas Well

Dong-kwon Han · †Sun-il Kwon

**Dept. of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University, Busan, Korea*

(Received November 6, 2015; Revised January 14, 2016; Accepted January 16, 2016)

요약

본 연구에서는 다단계 수압파쇄와 수평시추가 적용된 셰일가스정에서 생산자료의 유동형태에 따라 적절한 분석 방법과 궁극기체량을 산출하는 기법을 결정하는 방법을 정리한 흐름도를 제안하였다. 또한 1차 천이유동만이 나타나는 현장자료에 대해 생산천이유동 분석을 수행할 때 고려해야 하는 사항들을 제안하였다. log-log 그래프와 시간 제곱근 그래프 분석을 통해 생산자료의 유동 특성을 분류할 수 있고, 이 결과, 1차 천이유동만이 나타나는 생산자료는 이 유동이 종료되는 시점을 정확히 예측하여 이 시점을 기준으로 생산성을 각각 예측하여야 한다. 이 시점은 미세탄성과 탐사자료 해석을 통해 균열자극부피의 면적을 계산함으로써 산출할 수 있다. 공저압력자료나 미세탄성과 탐사자료가 없다면 셰일가스정에 적절한 경험적 방법을 활용하여 생산성을 예측할 수 있다. 생산기간이 짧은 자료는 상대적으로 생산기간이 긴 인접 생산정의 자료를 활용하여 생산기간의 적절성을 평가한 후 필요하다면 생산초기 자료를 제외하고 분석하는 것이 정확도를 향상시킬 수 있다. 또한 미세탄성과 탐사자료 해석에 의해 산출된 SRV는 분석방법이나 분석자의 주관에 의해 과대, 과소 평가될 수 있기 때문에 파쇄 단계, 파쇄유체 주입량, 생산성 분석을 통한 적절성 평가를 수행하여 필요한 경우, 저류층 시뮬레이션, 균열모델링, 생산천이분석을 통해 재산정하는 것이 필요하다.

Abstract - This paper presents development of an appropriate procedure and flow chart to analyze shale gas production data obtained from a multi-fractured horizontal well according to flow characteristics in order to calculate an estimated ultimate recovery. Also, the technical considerations were proposed when a rate transient analysis was performed with field production data occurred to only 1st transient flow. If production data show the 1st transient flow from log-log and square root time plot analysis, production forecasting must be performed by applying different method as before and after of the end of 1st linear flow. It is estimated by an area of stimulated reservoir volume which can be calculated from analysis results of micro-seismic data. If there are no bottomhole pressure data or micro-seismic data, an empirical decline curve method can be used to forecast production performance. If production period is relatively short, an accuracy of production data analysis could be improved by analyzing except the early production data, if it is necessary, after evaluating appropriation with near well data. Also, because over- or under-estimation for stimulated reservoir volume could take place according to analysis method or analyzer's own mind, it is necessary to recalculate it with fracture modeling, reservoir simulation and rate transient analysis, if it is necessary, after adequacy evaluation for fracture stage, injection volume of fracture fluid and productivity of producers.

Key words : shale gas well, production data analysis, 1st transient flow, stimulated reservoir volume, micro-seismic data

†Corresponding author:sikwon@dau.ac.kr

I. 서론

셰일가스정의 생산자료는 낮은 투과도와 수평수압파쇄의 영향으로 초기에 생산량이 크게 감소하고, 이후 생산량 감퇴율이 유동특성에 따라 달라지는 경향을 보인다[1]. 이에 따라 Arps 감퇴곡선식[2]에 적용할 때 천이유동 기간에서는 초쌍곡선 감퇴경향을 보이고, 경계영향유동(Boundary Dominate Flow; BDF)이 발생하면 쌍곡선 감퇴경향을 나타내는 것이 일반적이다. 따라서 유동영역이 바뀌는 시점을 규명할 수 있다면 향후 생산거동을 정확하게 예측할 수 있다. 그러나 셰일가스정은 천이유동이 수년에 걸쳐 일어나기 때문에 생산거동 예측을 수행하는 단계에서는 거의 대부분의 생산자료가 천이유동만을 보이므로 BDF가 일어나는 시점을 알아내는 것이 매우 어렵다. 따라서 미세탄성파 탐사(Microseismic 이하 MS) 자료 해석[3]이나 균열 모델링을 통해 천이유동이 끝나는 시점을 예측하여 이에 따라 생산성을 예측하여야 궁극가채량(Estimated Ultimate Recovery; EUR)을 정확히 산출할 수 있다. 만약 이 시점을 파악하는 것이 어렵다면 유동기간을 구분하지 않는 경험적 방법의 적용이 필요하다.

위에서 언급한 바와 같이 셰일가스정 생산성 예측은 생산자료의 유동영역을 구분하는 것이 중요하다. 국외 연구에서는 유동영역에 따라 생산자료 분석을 수행하는 방법이 제시되었으나 현장 엔지니어가 바로 사용하기에는 어려움이 있다 [4]. 국내에서는 분석이론과 적용방법에 대한 연구는 일부 진행되었으나, 생산자료의 유동영역에 따라 분석방법을 정리한 사례는 거의 찾을 수 없었다. 이에 본 연구에서는 생산자료가 1차 천이유동(1st Linear Flow 이하 1st LF)만이 나타나는 경우, BDF가 발생한 경우, 2차 천이유동(2nd Linear Flow 이하 2nd LF)까지 나타난 경우로 나누어 적절한 생산성 예측 방법을 제시하고자 하였다. 또한 천이유동만이 나타났으나, 1st LF가 끝나는 시점(End of linear flow, t_{elf})을 정확하게 규명하기 어려운 경우의 생산성을 예측할 수 있는 기법을 소개하였다. 이를 바탕으로 다단계 수압파쇄 수평정이 적용된 셰일가스 생산정에서 생산성을 예측하는 흐름도를 작성하였다. 마지막으로 1st LF만이 나타나는 현장 자료를 생산천이유동분석(Rate Transient Analysis; RTA)을 이용하여 생산성을 분석할 때 고려해야 하는 상황들을 제안하였다.

II. RTA 결과에 기반한 생산성 예측

셰일가스 저류층은 수압파쇄 수평정을 통해 생산이

이루어지며 인공 균열로 인해 유동이 발생하는 영역을 균열자극부피(Stimulated Reservoir Volume; SRV)이라고 한다. Fig. 1은 셰일가스 생산정에서 일반적으로 사용되는 다단계 수압파쇄 수평정에 대한 모식도로서, h 는 저류층 두께, y 는 인공 균열길이, x 는 수평정 길이, L 은 균열간격을 나타낸다. 셰일가스정의 생산거동은 셰일의 투과도가 낮아서 오랜 기간에 걸쳐 1st LF가 발생하고, 이 때 유동은 균열 방향으로 선형적으로 일어난다. 이후 균열간의 간섭으로 BDF가 발생하고, 생산이 지속되면 균열자극 저류층 외곽에서 내부로 2nd LF가 일어난다. 이러한 유동 특성을 고려하지 않고 전통가스정의 수직정 방사형 유동을 분석하는 기법을 통해 생산성을 예측할 경우에는 부정확한 결과를 도출하므로 셰일가스정에 적합한 분석방법이 필요하다. 본 연구에서 사용하는 그래프 분석법의 식들은 대부분 선행연구[5,6]에서 언급되어 본 논문에서는 생략하였다.

2.1. 1차 천이유동 (1st LF) 생산자료 분석

셰일가스정에서 생산 개시 후 5년 이내의 생산자료는 대부분 1st LF 영역에 속한다고 알려져 있다. 따라서 생산초기 자료를 이용하여 생산성을 예측하는 경우, 본 분석방법의 적용이 일반적이다.

먼저 1st LF가 일어나는 생산자료를 Fig. 2a의 log-log 그래프와 같이 유사압력에 따른 정규화된 생산량(Normalized rate) 또는 그 도함수와 유사시간(Pseudo-time) 또는 물질평형 유사시간(Material balance pseudo-time)에 대하여 log-log 그래프로 나타내어 추세선의 기울기에 따라 유동영역을 구분한다. 이 그래프에서 추세선의 기울기가 1/2로 나타난 것으로부터 천이유동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 만약 그래프에 나타나는 점들의 경향이 분산되어 분석이 어려운 경우에는 x축의 시간 함수를 중첩시간(Superposition time)으로 바꾸어서 도시하면

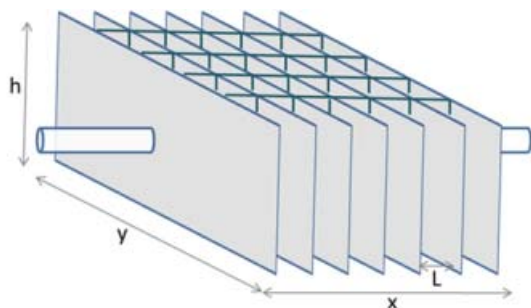


Fig. 1. Multi-stage fractured horizontal well in a shale gas reservoir.

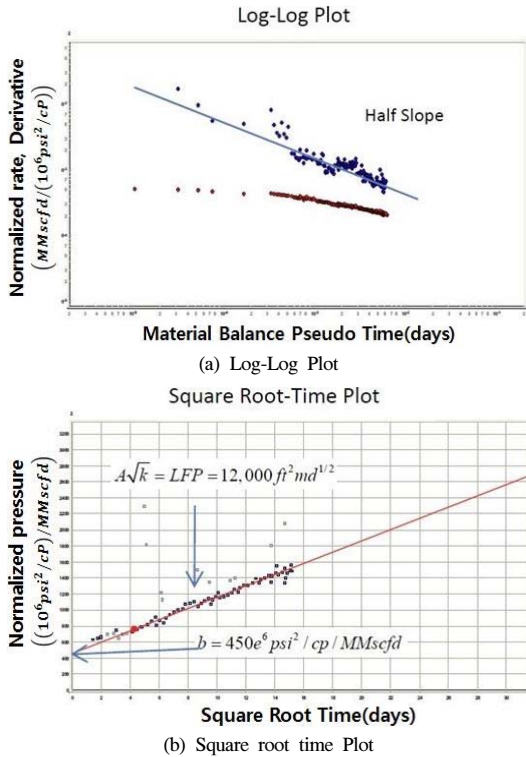


Fig. 2. Analysis plot and calculated parameter for Marcellus shale gas reservoir- 7months[4].

자료의 선형성이 더 명확하게 나타나므로 기울기를 분석하기가 용이해진다. 또한, 생산량에 따른 정규화된 유사압력(Normalized pseudo pressure)을 시간제곱근 또는 중첩시간 제곱근에 대하여 그래프로 나타내어 셰일가스정 생산거동을 분석한다 (Fig. 2b). 시간제곱근(Square Root Time; SRT) 그래프에서 천이유동이 발생한 영역에서는 정규화된 유사압력의 값들이 시간의 변화에 따라 직선의 경향으로 나타난다.

인공 균열에서 나타나는 선형유동 구간에서 유정손상지수가 관찰되고 이는 생산성에 상당한 영향을 미친다. 이는 SRT 그래프에서 선형유동인자(Linear Flow Parameter; LFP)와 함께 관찰할 수 있으며, y 축 절편 값으로 산출할 수 있다. 또한 SRT 그래프의 LFP를 이용하여 SRV 내에서 자연균열과 인공균열의 투과도가 반영된 유효 저류층 투과도를 계산할 수 있다. SRT 그래프에서 나타나는 추세선의 기울기는 식 (1)에 의해 산출되고 향후 생산성 예측을 위한 변수로 이용된다.

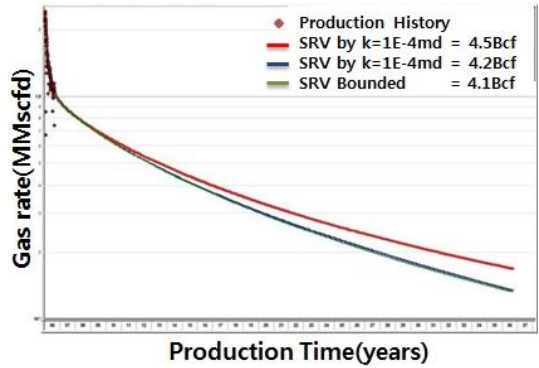


Fig. 3. 30-year production forecasts for Marcellus shale gas reservoir[5].

$$m = \frac{315.4T}{h \sqrt{(\phi\mu_g c_t)_i}} \times \frac{1}{p_{pi} - p_{pwf}} \times \frac{1}{x_f \sqrt{k}} \quad (1)$$

1st LF만이 나타나는 생산자료를 전통 가스전에서 사용하는 Arps의 쌍곡선 방정식에 적용하여 회귀분석을 통해 생산성을 예측하면 생산기간이 무한대로 진행되어 EUR이 무한한 값을 보인다. 이는 다단계 수압파쇄 수평정이 적용된 셰일가스정에 천이유동이 무한대로 발생한다는 것을 의미하는 것으로 인공균열간의 간섭으로 경계유동영향이 발생하는 현실과 맞지 않는다. 따라서 유동영역이 변화하는 t_{eff} 를 계산하여 생산량을 감퇴시켜야 생산성을 현실적으로 예측할 수 있다.

생산초기에 1st LF가 발생하는 생산자료를 이용하여 유동물질평형형(Flowing Material Balance; FMB) 그래프에서 원시가스부존량을 산출하고 이로부터 균열 자극 면적을 계산하는 것은 타당하지 않다. 그 이유는 FMB 분석이 BDF 자료를 직선회귀분석하는 방법이기 때문이다. 만약 천이유동 생산자료를 가지고 FMB를 통해 원시가스부존량을 산출하면 이는 SRV의 일부에 해당되고, 이를 토대로 향후 생산성을 예측하면 EUR이 실제보다 작게 산출되는 문제점이 나타난다(Fig. 3).

이에 따라 MS를 통해서 취득한 자료로부터 SRV 면적을 정확히 산출하여 천이유동이 끝나는 시점을 산출하여야 한다 (식 (2)). 1st LF가 끝나는 시점을 구하면 천이유동 구간에서는 관측된 생산자료를 회귀 분석하여 생산성을 예측하고 BDF 구간에서는 Arps의 식을 토대로 생산성을 예측할 수 있다[7]. 이때 BDF 구간에서 감퇴지수 b 는 0.5를 일반적으로 적용하는데 이는 균열의 길이와 간격이 균일한 이상적인 다단계 수압파쇄 수평정에서 나타나는 수치이다.

$$t_{eif} = \left[\frac{Ah(\phi\mu_g c_i)_i m(p_{pi} - p_{pwf})}{200.6T} \right]^2 \quad (2)$$

2.2. 경계영향유동 (BDF) 생산자료 분석

셰일가스정에서 취득한 생산자료를 log-log 그래프에 도시하여 정규화된 생산량에 대한 추세선의 기울기가 1로 나타나면 BDF가 발생하였음을 알 수 있다. 이후 SRT와 FMB 그래프를 통해 향후 생산성 예측을 위한 변수를 도출할 수 있다. 유사압력을 생산량에 대해 정규화하여 SRT 그래프로 나타내면 1st LF 영역에 해당하는 값들은 직선의 경향으로 나타나고, BDF 자료는 곡선으로 도시된다. 반대로 FMB 그래프에서는 1st LF 영역은 곡선으로 나타나고, BDF 자료는 직선으로 도시된다(Fig. 4). FMB 그래프는 유사압력에 따른 정규화된 생산량을 유사압력에 따른 정규화된 누적생산량에 대하여 나타낸다. FMB 그래프에서 정규화된 생산량 자료들이 직선으로 나타나면, 그 구간을 직선으로 회귀 분석하여 연장한 x축 절편값으로 원시가스부존량을 산출할 수 있다. 또한 FMB 그래프에서 산출된 균열자극 저류층 내의 원시가스부존량과 초기 가스용적인자, 공극률, 저류층 두께, 가스 포화율을 이용하여 SRV 면적(A_{SRV})을 계산할 수 있고, 여기서 산출된 A_{SRV} 를 이용하여 균열의 길이를 산출할 수 있다.

생산천이유동 분석에서 BDF가 나타났다면, Arps의 식을 이용하여 BDF 생산자료만을 회귀분석함으로써 향후 생산성을 예측할 수 있다.

2.3. 2차 천이유동 (2nd LF) 생산자료 분석

셰일가스 저류층에서 생산이 진행되면서 SRV내의 압력이 떨어지면 균열자극 저류층의 외곽에서 내부로 유동이 발생하게 된다. 이 기간 동안 취득한 생산자료를 log-log 그래프에 도시하면 천이유동이 두 번 나타나는 것을 확인할 수 있다. 생산 초기에 발생하는 1st LF의 원인은 균열자극 저류층내에서 수압파쇄로 인해 만들어진 균열의 영향으로 유동이 선형적으로 발생하기 때문이며, 후기에 발생하는 2nd LF은 자극을 받지 않은 외곽의 암체에서 SRV로 유동이 선형적으로 나타난 결과이다 (Fig. 5).

SRT 그래프에도 직선의 경향을 보이는 구간이 두 번 나타나는 것으로부터 1st LF 과 2nd LF이 발생하였음을 다시 확인할 수 있다. 2nd LF 영역에서 산출한 선형유동인자로부터 암체의 투과도를 산출할 수 있다. 2nd LF가 나타나는 생산자료에 대한 생산성 예측은 BDF자료의 생산성 예측과 동일한 방법으로 생산 후반부 자료의 회귀분석을 통해 간단히 생산성을 예측할 수 있다.

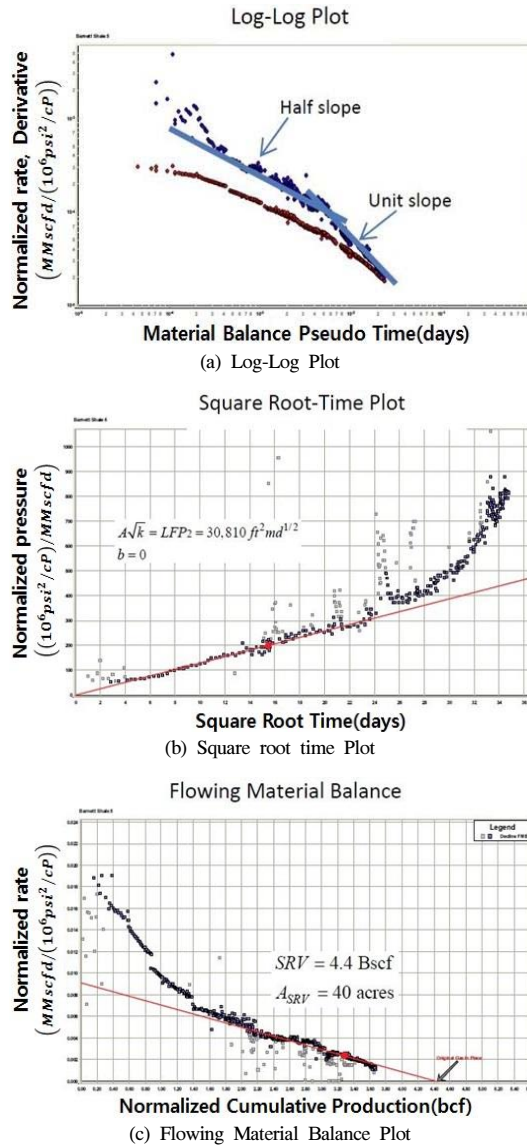


Fig. 4. Analysis plot and calculated parameter for Barnett shale gas reservoir- 3.5years[5].

III. 경험적 방법 적용에 의한 생산성 예측

셰일 및 치밀가스 저류층에서 생산성 예측을 통해 EUR을 산출하기 위해서는 위에 언급한 RTA 결과에 기반한 생산성 예측 방법이 적용될 수 있지만 이 방법은 다음의 이유에 따라 적용이 제한될 수 있다.

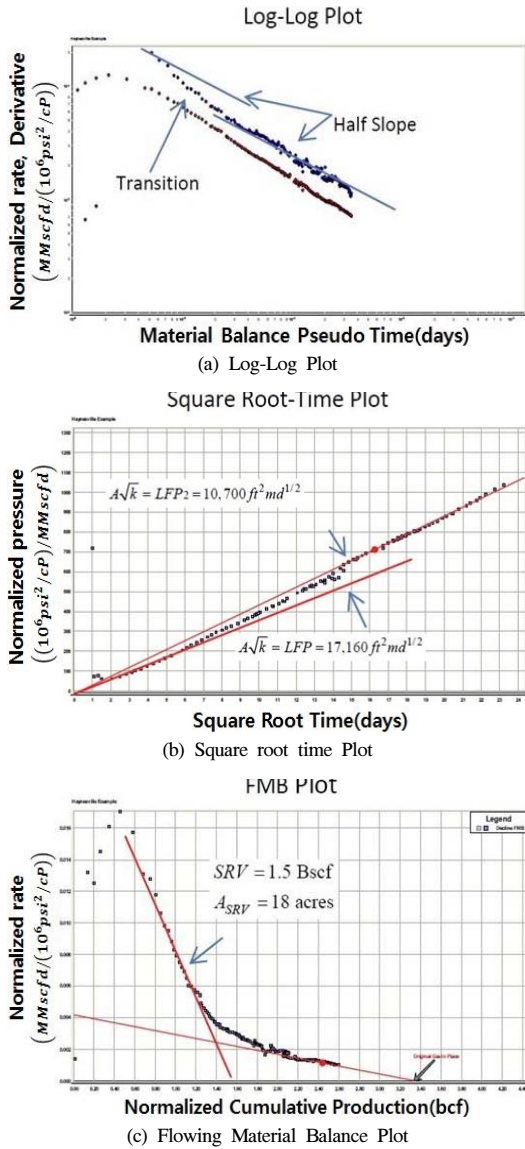


Fig. 5. Analysis plot and calculated parameter for Haynesville shale gas reservoir-8months[5].

먼저 RTA를 위해서는 공저압력자료가 필요하다. 따라서 공저 게이지가 설치되어 생산기간 동안의 압력이 측정되었거나, 최소한 정두 압력 게이지를 통해 측정된 압력이 있어야 한다. 또한 1st LF 자료를 가지고 생산성을 예측할 때는 천이유동이 종료되는 시점을 정확히 예측하여야 하는데, 이때 SRV 면적을 산출하여야 하고, 이를 위해서는 MS 자료가 필

요하다. 마지막으로 생산기간이 짧은 경우에는 시험 생산과 생산량 조절 등의 문제로 SRT 분석도 오차를 동반할 가능성이 있다. 이러한 경우 다단계 수압파쇄 수평정이 적용된 치밀 가스전에서 적용 가능한 경험적 분석 기법을 통해 생산성을 예측해야 한다.

경험적 분석방법으로는 PLE(Power Law Exponential)[8], SEPD(Stretched Exponential Production Decline)[9], Duong의 경험식[10] 등이 있다. PLE 방법은 모든 치밀가스 저류층에 이용이 가능하나 생산성 예측을 위해 계산식에 쓰이는 변수를 선정하기 어려우며 엔지니어의 판단에 따라 과소, 과다 예측될 수 있다. SEPD 방법은 저류층투과도가 0.001 ~ 0.00001 md일 때 생산성 예측이 정확한 것으로 보고되었으며 투과도가 0.001md 보다 클 경우 생산성을 보수적으로 예측하는 경향이 있다. Duong의 방법은 SEPD 방법과 같이 투과도가 0.001~0.00001md 저류층에서 생산성 예측이 정확하다. 그러나 투과도가 높을수록 EUR이 과다 예측되는 경향이 있다[11].

VI. 생산성 예측기법 선정 차트

앞에서 언급한 생산자료 분석 및 생산성 예측 이론과 현장 생산자료 분석 과정을 통해 다단계 수압파쇄 수평정이 적용된 셰일가스전에서 생산자료 분석과 EUR를 추정하는 순서를 정리한 차트를 개발하였다 (Fig. 6).

먼저 유정완결, 수압파쇄, 유체물성, 저류층 물성 자료들을 가지고 있고, 가장 중요한 저류층 압력자료가 존재한다면 RTA를 수행하는 것이 가능하다. 만약 압력자료와 유정완결, 수압파쇄 자료가 없다면 RTA는 불가능하지만, 유체물성자료만이 없는 경우에는 인접 광구나 다른 생산정 자료를 활용하여 분석하는 것도 가능하다. 만약 RTA를 수행할 수 없다면 향후 생산성 및 EUR은 압력을 사용하지 않는 경험적 기법의 적용이 필요하다.

RTA 분석이 가능하다면, 이 자료에 대한 log-log 그래프와 SRT 그래프 분석을 통해 현재 생산자료가 어떤 유동영역에 있는지 파악한다. 현재 생산자료가 2nd LF까지 발생한 자료라면 RTA를 통해 압력 투과도, SRV 면적, 유정손상지수, 균열길이 등을 산출할 수 있으며, Arps의 쌍곡선 감퇴곡선법을 통해 향후 생산성과 EUR을 산출할 수 있다. 만약 생산자료가 BDF까지 발생했다면 RTA를 통해 SRV 면적, 유정손상지수, SRV 내 유효 투과도, 균열길이를 구할 수 있고, Arps의 쌍곡선 감퇴곡선법을 통해 향후 생산성과 EUR을 산출할 수 있다.

생산자료가 1st LF 자료라면 RTA를 통해 SRV 내

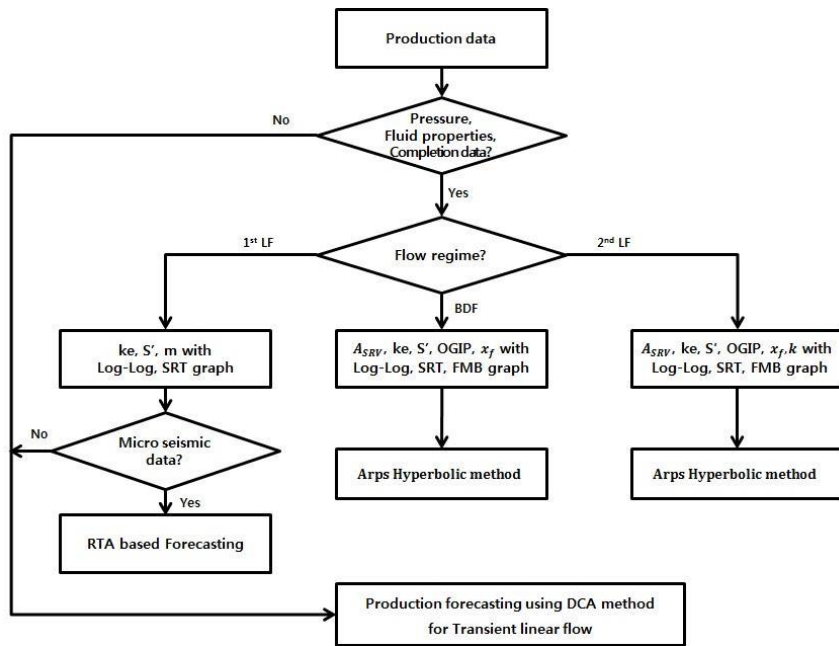


Fig. 6. Flow chart for shale gas production data analysis.

유효 투과도, 유정손상지수를 계산할 수 있다. 이 생산자료를 이용하여 향후 생산성과 EUR을 산출하기 위해서는 t_{inf} 를 산출해야 하는데, 이때에는 MS 자료에서 산출된 SRV가 필요하다. 이 자료가 있다면 RTA 기반의 생산성 예측이 가능하지만, 이 경우에도 생산기간이 충분한지 판단하여 생산기간이 짧다면 SRT 그래프 분석에서 기울기를 산출할 때 생산기간이 더 긴 유사 생산정 자료를 활용하여 경향을 맞추는 보정작업이 필요하다. 또한 SRV 자료가 있는 경우에도 이 자료의 적절성 분석을 통해서 자료의 신뢰성이 떨어지면 SRV값을 보정해서 사용하여야 하고, 보정이 불가능하다면 MS 탐사자료 해석에 기반한 SRV를 적용할 수 없다.

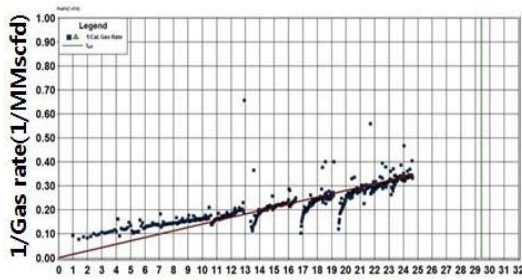
만약 MS 자료가 없어 SRV를 알 수 없다면 균열 시뮬레이션을 통해 SRV를 추정하거나 생산성과 완결 조건이 유사한 다른 생산정의 SRV 자료를 활용할 수 있다. 마지막으로 SRV 자료가 없거나 신뢰성이 떨어지는 경우, 또는 SRV 자료가 있지만 저류층 물성이 유사한 인접 생산정 자료가 없는 경우에는 경험적 방법을 토대로 분석을 수행하는 것이 생산성 예측의 정확도를 더 높일 수도 있다.

V. 현장 생산자료 분석 시 고려사항

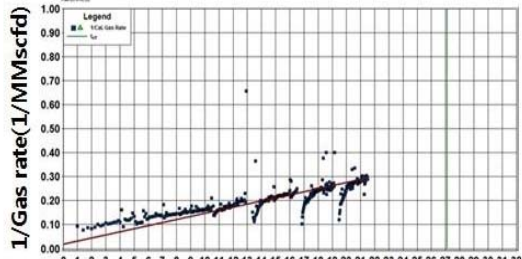
5.1. 생산기간이 짧은 생산정의 생산자료 분석

세일 가스전의 생산정 자료 중에서 생산기간이 짧은 자료는 생산초기 시험생산, 지상설비 안정화 등의 문제로 생산자료의 정확도가 떨어지는 현상이 나타난다. 이럴 때는 먼저 생산이 수행된 다른 PAD 생산정(생산기간이 상대적으로 긴 생산정) 중에서 동일한 저류층에서 생산을 수행하고 있는 생산정의 자료를 이용하여 생산자료 활용의 적절성을 평가할 필요가 있다.

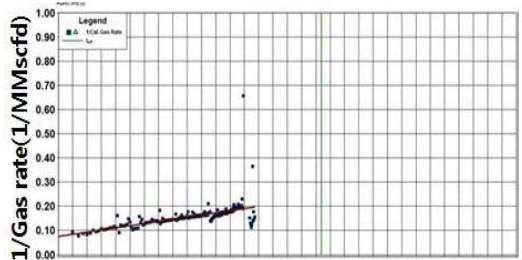
생산기간이 상대적으로 짧은 PAD B, C 생산정의 SRT 그래프 분석을 위한 생산기간의 적절성을 확인하기 위하여 PAD A 생산정의 생산자료를 분석하였다(Fig. 7). Fig. 7(a)는 PAD A-1 생산정의 전체 생산자료(생산기간 614일)를 이용하여 SRT 그래프 분석을 통해 EUR을 산출하였고, (b)는 생산 개시 후 479일(PAD B 생산정들의 평균 생산 기간) 동안의 자료를 이용하여 분석을 수행하였으며 (c)는 211일(PAD C 생산정들의 평균 생산 기간) 동안의 생산자료에 대해 분석을 수행하였다. 그 결과 (a)와 (b)는 EUR이 약 0.2 bcf로 큰 차이가 나타나지 않았으나, (c)의 경우 (a)에 비해 1.2 bcf 적게 예측됨을 확인할 수 있었다 (d). 이는 SRT 그래프 분석 시 생산자료가 충분하지



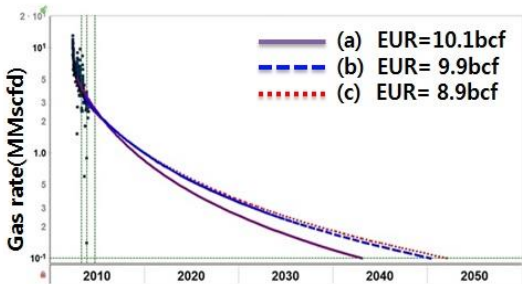
(a) production time of PAD A-1(614day)



(b) production time of PAD A-1(479day)

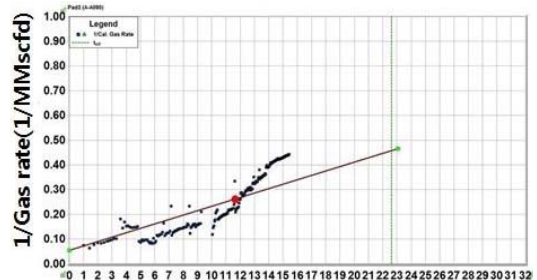


(c) production time of PAD A-1(211day)

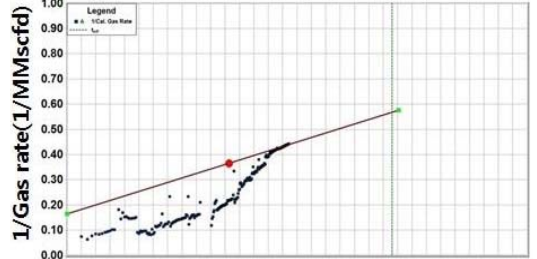


(d) comparison of EUR

Fig. 7. Comparison of EUR according to production time for producer PAD A-1.



(a) SRT analysis using all data fitting of PAD C-1



(b) SRT analysis using late data fitting of PAD C-1

Fig. 8. Comparison of SRT analysis according to production time for producer PAD C-1.

못할 경우에 SRT 그래프 기울기에 따라 RTA 분석 시 산출되는 저류층 물성과 EUR값이 달라질 수 있음을 의미한다.

Fig. 8의 PAD C-1 생산정 경우에는 SRT 그래프 상에서 초기자료와 후반자료의 매칭결과가 크게 차이를 보이는데, 후반 생산자료를 반영한 (b) 생산성 예측 결과가 초기생산자료 (a)보다 0.6 bcf 큰 것으로 확인되었다. PAD C 분석에서는 후반 생산 추이를 이용하여 생산성 예측을 수행하는 것이 적절하다고 판단된다.

5.2. SRV 해석 결과 적절성 분석

최근까지 셰일가스 저류층의 다단계 수압파쇄 수평정에서 MS를 통해 취득한 SRV의 해석에 대한 몇 개의 논문이 제시되었는데 이러한 노력에도 불구하고 생산자료와 압력감소(Depletion efficiency)에 대한 수학적 상관관계를 통해 정량적인 SRV를 산출하는데 어려움이 있다. 수압파쇄가 진행되는 동안 취득한 MS 자료는 이벤트를 분류하기 위해 3D 탄성파로부터 유도된 지질학적 자료와 함께 종합적인 분석이 이루어진다[12].

Suliman 등[13]은 Eagle Ford 셰일가스 저류층의

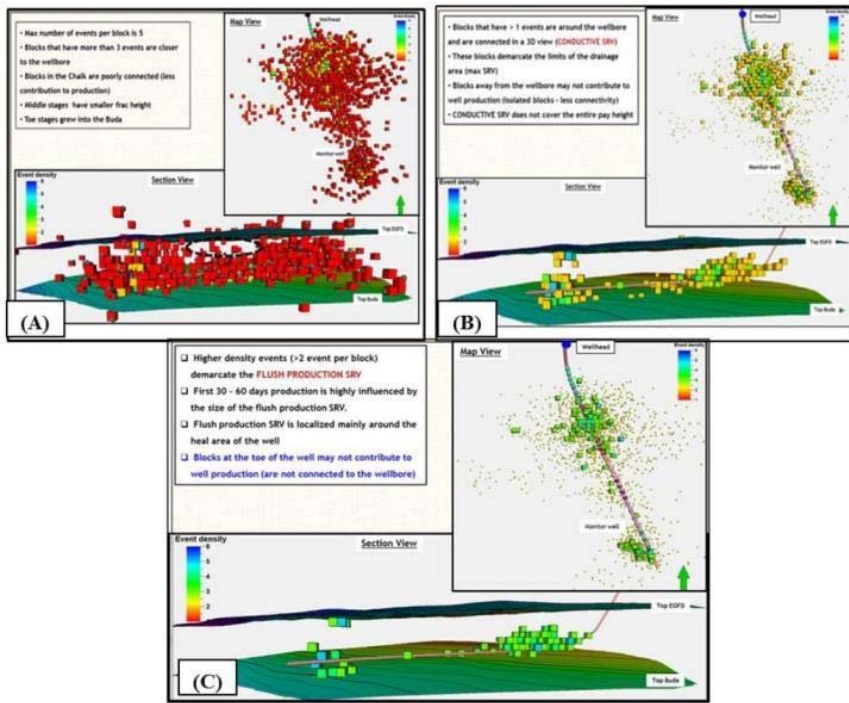


Fig. 9. (A) Geometry of Hydraulic SRV, (B) Geometry of conductive SRV, (C) Geometry of Flush SRV[9].

생산성 향상을 위해 4,000,000~5,000,000 lb의 지지체와 10,000~15,000 bbl의 파쇄 유체가 주입되면서 과도한 균열이 생성되었다고 보고하였다. MS에서 발생하는 이벤트는 파쇄유체의 밀도와 관련이 있고, 이를 해석하여 수압파쇄에 의해 생성된 SRV의 크기와 형태를 분석한다. Fig. 9(a)는 미세탄성과 탐사에서 취득한 이벤트를 통해 균열이 생성된 부피를 산출한 것이다. SRV의 형태는 기존의 지질구조와 암석역학적 물성에 영향을 받아서 매우 불규칙한 모양을 나타내고 있다. Fig. 9(b)는 하나의 격자 블록에 미세탄성과 이벤트가 두 개 이상 포함이 되어 해석된 부피를 보여주고 있으며, Fig. 9(c)는 하나의 격자 블록에 미세탄성과 이벤트가 세 개 이상 포함이 되어 해석된 SRV를 보여주고 있다.

이 결과는 MS 자료 해석 시 인공균열로 간주하는 이벤트 수에 따라 SRV가 크게 달라진다는 것을 의미하며, 이는 해석 방법과 기준에 따라 SRV가 큰 차이를 보일 수 있음을 나타낸다. 또한, 셰일가스가 존재하지 않는 영역에서 유체의 밀도가 높게 측정되었다면, 수압파쇄가 저류층 두께 이상으로 더 크게 형성된 것으로 간주할 수도 있다. MS 자료를 통

해 산출되는 SRV는 측정오차, 분석방법 등에 따라 큰 차이를 수반할 수 있다. 따라서 MS로부터 산출된 SRV를 생산정의 생산성, 균열 스테이지, 파쇄유체 주입량 등을 고려하여 분석한 후 과다, 과소 산정된 가능성이 높은 생산정에 대해서는 RTA, 저류층 시뮬레이션, 균열 모델링 등을 통한 보정 과정을 거쳐 MS 자료를 재해석 해야 한다.

VI. 결론

본 연구에서는 다단계 수압파쇄 수평정이 적용된 셰일가스정에서 생산자료의 종류와 불확실성, 유동 특성에 따라 생산성을 예측하는 방법을 정리한 차트를 제안하고, 이를 활용한 현장자료 분석 시 고려해야 할 기술적 내용들을 제시하였다.

(1) log-log와 SRT 그래프 분석 결과, 1st LF만이 나타나는 생산자료는 1st LF가 종료되는 시점을 정확히 예측하여 이 시점을 기준으로 생산성을 각각 예측하여야 한다. 1st LF가 종료되는 시점은 MS 자료 해석을 통해 SRV 면적을 계산함으로써 산출할

수 있다.

(2) 경계유동이 나타나는 생산자료는 FMB 그래프 해석을 통해 SRV 면적을 산출할 수 있으며 이를 통해 균열 길이를 예측할 수 있다. 이 결과는 MS 결과와 비교 분석을 통해 SRV를 더 정확하게 산출하는데 활용될 수 있다. 이러한 생산자료는 BDF 자료만을 감퇴곡선식에 적용함으로써 생산성을 예측할 수 있다.

(3) 2nd LF가 나타나는 생산자료는 후반부 생산자료를 Arps 감퇴곡선식에 적용함으로써 생산성을 예측할 수 있고, 2nd LF 자료에 대한 SRT를 통해 셰일층의 투과도를 산출하는 것이 가능하다.

(4) RTA 분석이 가능한 공저압력자료가 존재하지 않거나 1st LF 자료를 분석하는데 MS 자료가 없다면 셰일가스정에 적절한 경험적 방법을 활용하여 생산성을 예측할 수 있다.

(5) 생산초기 자료는 시험생산, 지상설비 안정화 등의 문제로 생산자료의 정확도가 떨어지기 때문에 상대적으로 생산기간이 긴 인접 생산정의 자료를 활용하여 생산기간의 적절성을 평가한 후 필요하다면 생산초기 자료를 제외하고 분석하는 것이 정확도를 향상시킬 수 있다. 또한 MS에 의해서 산출된 SRV는 분석방법이나 분석자의 주관에 의해 과다, 과소 평가될 가능성이 높기 때문에 생산정들 간의 파쇄 단계, 파쇄유체 주입량, 생산성 분석 등 적절성 평가를 수행하여 필요한 경우 균열모델링, 저류층 시물레이션, RTA 분석을 통해 재산정할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부 에너지기술개발사업의 일환으로 수행한 “디지털 기술을 활용한 유가스전 현장물성 원격계측 및 관리시스템 개발” 과제(2014252010040)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

사용기호

- A : 자극을 받은 저류층의 면적 [ft²]
- c_i : 총등온압축률 [1/psi]
- h : 생산층 두께 [h]
- k : 투과도 [md]
- m : 시간제곱근 그래프에서 직선의 기울기 [psi²day^{1/2}/cp/Mscf]
- p_{pi} : 초기 유사압력 [psi²/cp]
- p_{pwf} : 유사유동압력 [psi²/cp]
- T : 저류층온도 [°C]

t_{elif} : 선형유동이 종료되는 시간 [days]

x_f : 균열반길이 [ft]

그리스 문자

φ : 공극률

μ_g : 가스점성도(cp)

REFERENCES

- [1] Kupchnenko, C. L., Gault, B. W., and Mattar, L., “Tight Gas Production Performance Using Decline Curves”, presented at the CIPC/SPE Gas Technology Symposium Joint Conference, 16-19 June, Calgary, Alberta, (2009)
- [2] Arps, J. J., “Analysis of Decline Curves”, *A.I. M.E.*, 228-247, (1945)
- [3] Shin, C. H., Lee, S. M., Kwon, S. I., Park, D. J., and Lee, Y. S., “A Classification and a Survey on the Core Technology for Shale Gas Development”, *The Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, 49(3), 395-410, (2012)
- [4] Clarkson, C. R., “Production Data Analysis of Unconventional Gas Wells: Workflow”, *International journal of Coal Geology*, 109(110), 147-157, (2013)
- [5] Lee, S. M., Jung, J. H., Shin, C. H., and Kwon, S. I., “Study on Production Performance of Shale Gas Reservoir using Production Data Analysis”, *The journal of the Korean Institute of Gas*, 17(4), 58-69, (2013)
- [6] Anderson, D. M., Nobakht, M., Mohadam, S., and Mattar, L., “Analysis of Production Data from Fractured Shale Gas Wells”, paper SPE 131787 presented at SPE Unconventional Gas Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, (2010)
- [7] Wattenbarger, R. A., El-Bandi, A. H., Vilegas, M. E., and Maggard, J. B., “Production Analysis of Linear Flow into Fractured Tight Gas Well”, paper SPE 39931 presented at SPE Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium and Exhibition, Denver, Colorado, (1998)
- [8] Ilk, D., Rushing, J. A., and Perego, A. D., “Exponential vs. Hyperbolic Decline in Tight Gas Sands - Understanding the Origin and Impli-

- cations for Reserve Estimates Using Arps Decline Curves”, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, held in Dever, Colorado, (2008)
- [9] Valko, P. P., and Lee, W. J., “A Better Way to Forecast Production from Unconventional Gas Wells”, Paper 134231, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Florence, Italy, (2010)
- [10] Duong, A., “An Unconventional Rate Decline Approach for Tight and Fracture-Dominated Gas Wells”, Paper CSUG/SPE 137748 presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada,(2010)
- [11] Yu, S., “Best Practice of Using Empirical Methods for Production Forecast and EUR Estimation in Tight/Shale Gas Reservoirs”, Paper 167118, presented at the SPE Unconventional Resources Conference-Canada held in Calgary, Canada, (2013)
- [12] Nagel, N., Garcia, X., Nagel, M., and Lee, B., “Understanding SRV : A Numerical Investigation of Wet vs Dry Microseismicity during Hydraulic Fracturing”, paper SPE 159791 presented at Annual Technical Conference and Exhibition, held in San Antonio, USA,(2012)
- [13] Suliman, B., Meek, R., Hull, R., Bello, R., Portis, D., and Richmond, P., “Variable Stimulated Reservoir Volume(SRV) Simulation : Eagle Ford Shale Case Study”, paper SPE 168832 presented at Unconventional Resources Technology Conference, held in Denver, USA,(2013)