

석탄층 메탄가스 저류층의 유정생산시험 설계 및 수행절차 수립연구

박진영 · 이정환*

전남대학교 에너지자원공학과

Development of Designing and Performing Procedure for Well Test in Coalbed Methane(CBM) Reservoir

Jinyoung Park and Jeonghwan Lee*

Department of Energy and Resources Engineering, College of Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea

The most critical factor in developing coalbed methane(CBM) reservoir is absolute permeability. Both productivity and economics of the CBM depend on the absolute permeability. The methods to estimate it are core analysis and well test. However, absolute permeability determined by core analysis cannot be a good representative of CBM reservoir. Therefore, it is generally estimated by well test. In this study, well test methods applicable of CBM reservoir were classified with their characteristics. Merits and demerits of each well tests were also analyzed. Based on those parameters, design considerations and procedures of well test were derived. After each well tests was performed, the procedure of well test interpretations to estimate reservoir properties such as absolute permeability and skin factor was presented.

Key words : coalbed methane, well test, slug test, injection falloff test, absolute permeability

석탄층 메탄가스(coalbed methane; CBM)를 개발하는데 있어서 생산성과 경제성을 좌우하는 절대투과도(absolute permeability)를 산출하는 것은 매우 중요하다. 절대투과도를 측정하는 방법에는 코어분석(core analysis)과 유정생산 시험(well test) 등이 있다. 하지만 코어분석을 통해 도출된 절대투과도는 CBM 저류층을 대표할 수 없기에 일반적으로 유정생산시험을 통해 절대투과도가 산출된다. 이에 본 연구에서는 CBM 저류층에 적용 가능한 유정생산시험을 분류하고 각 시험기법별 특성 및 장·단점을 분석하였다. 이를 기반으로 유정생산시험 설계 및 수행절차를 수립하였으며, 유정생산시험 수행 후 취득된 자료를 통해 절대투과도와 손상지수(skin factor)와 같은 저류층 물성을 도출하기 위한 자료해석 절차를 제시하였다.

주요어 : 석탄층 메탄가스, 유정생산시험, 슬러그시험, 주입-배출시험, 절대투과도

1. 서 론

2012년 국제에너지기구(international energy agency; IEA)의 발표 자료에 따르면 2007-2030년 세계 에너지 소비는 40% 증대될 것으로 예상하였으며, 2011년 1 bbl 당 125달러였던 석유의 가격이 2035년에는 215 달러로 증가할 것으로 예측하였다. 게다가 석유가스점 접연구회(association for the study of peak oil and

gas; ASPO)의 2009년 예측 자료에서 석유의 생산량은 증가하고 있지만 석유 발견 비율은 상당히 감소하고 있음이 보고된 바 있다. 따라서 에너지 소비량 급등과 고유가 시대가 맞물리면서 비전통가스(unconventional gas)자원의 중요성이 크게 부각되고 있다(Huh and Lee, 2010; Lee, 2011). 특히, 석탄층 메탄가스(coalbed methane; CBM)는 자원의 편중이 없고 개발을 위한 접근이 용이하며, 전 세계적으로 약 9,051 Tcf(trillion

*Corresponding author: jhwan@jnu.ac.kr

cubic feet)정도의 많은 자원량 부존이 예상됨에 따라 CBM 개발에 대한 관심이 증대되고 있다(Holditch and Madani, 2010).

CBM 유정생산시험에 관한 연구는 CBM이 본격적으로 개발되기 시작한 1990년대 이후부터 가속화되었으며, 산출시험(drill stem test; DST), 슬러그시험(slug test), 주입-배출시험(injection falloff test; IFT) 및 압력강하/상승시험(pressure drawdown/buildup test) 등이 현장 환경에 따라 선택적으로 적용되어 각각의 기준을 제시하고 있으나, 이를 통합한 체계적인 절차나 기준 등에 대한 연구는 미미한 실정이다(Clarkson, 2010). 우리나라는 1990년대 CBM에 대한 개념이 도입된 이래로 석탄층 메탄가스 개발의 중요성을 인지하고 공사와 연구소를 중심으로 CBM 개발 타당성 및 탐사작업에 대한 연구를 수행한 실적이 있으나(Jang and Lee, 2013), 대상 석탄층의 복잡한 지질구조와 석탄갱을 통한 가스 유출의 원인 등으로 메탄가스 함량이 매우 적음을 확인하였다(Ko *et al.*, 2008). 따라서 국내의 CBM 개발·생산관련 기술은 해외자원개발에 초점을 맞춰야하며 기초기술 수립에 역량을 집결해야 한다. 특히, CBM 개발·생산관련 기술은 이제 초입단계로 석탄층 유정생산시험에 관한 기술이나 시행 경험은 전무하며, CBM 개발에 있어 유정생산시험 기술 연구가 선행될 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 미국 가스기술연구소(gas technology institute; GTI)의 선행연구를 바탕으로 CBM 개발 시, 우선적으로 고려해야 하는 생산성 및 경제성을 파악하기 위해 CBM에 적용할 수 있는 유정생산시험을 분류하고 각 시험기법별 장·단점을 분석하여, 유정생산시험 설계 및 수행절차를 수립하며 취득된 자료의 기술적 해석절차를 제시하고자 한다.

2. CBM 유정생산시험

CBM은 식물성 유기물을 근원으로 하는 석탄이 지하 심부에서 열과 압력에 의해 탄화과정(coalification)을 거치면서 생성된 것으로, 석탄층 내의 미세공극 표면에 흡착되거나 석탄 공극 내에 유리가스(free gas)형태로 존재한다(Arenas, 2004). 또한 CBM 저류층은 Fig. 1에서와 같이 퇴적 및 탄화과정에 의해 형성된 1차 공극(primary porosity)과 암석의 물리적 변형, 용해, 팽창 및 백운화 작용을 통해 자연적으로 생성된 2차 공극(secondary porosity)의 이원공극시스템(dual porosity system)으로 이루어진 불균질성 저류층이다(Mora and Wattenberger, 2007).

CBM을 개발하기 위해서는 CBM의 생산성 및 경제성을 좌우하는 절대투과도(absolute permeability, k)를 파악하는 것이 매우 중요하나, 석탄층의 불균질성과 석탄이 탄화하는 과정 동안 석탄 자체에 생성된 균열인 탄리(cleat)의 방향, 간격 및 밀도 등의 영향으로 이를 측정하는 것이 어렵다. 절대투과도를 측정하는 방법에는 코어분석(core analysis) 및 유정생산시험(well test) 등이 있다. 그러나 코어분석을 통해 도출된 절대투과도는 CBM 저류층을 대표할 수 없을 뿐 아니라, 코어 채취 시 메탄가스가 방출되거나 코어 내부에 균열이 발생되어 투과도 측정시 오차가 발생할 수 있기 때문에 일반적으로 유정생산시험을 통해 절대투과도를 산출한다(Mahendra, 1997; Aminian, 2006).

유정생산시험을 수행할 경우, 저류층 압력이 임계탈착압력(critical desorption pressure)이하로 감소하여 2상 유동(2-phase flow)이 발생하게 되면 메탄가스와 석탄층에 포화된 물의 상대투과도(relative permeability)까지 고려해야하므로 유정생산시험 자료 분석이 어렵

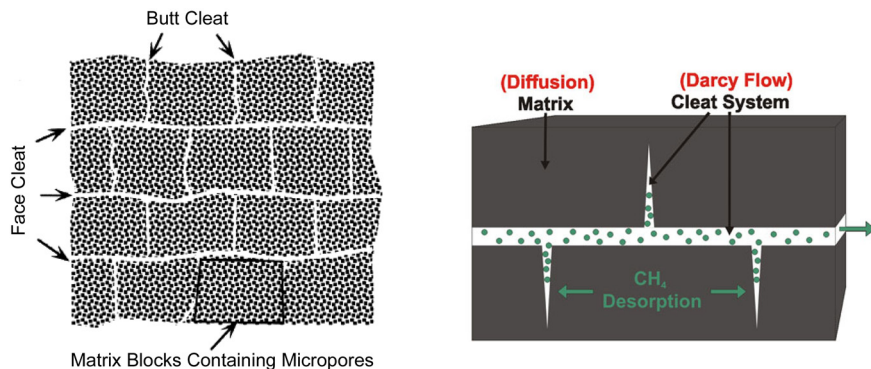


Fig. 1. Cleat system and production mechanism of CBM (King and Ertekin, 1989; Kansas Geological Survey, 2006).

고 복잡해진다. 따라서 일반적으로 CBM 저류층에서의 유정생산시험은 저류층에 물을 주입함으로써 저류층의 압력을 임계탈착압력 이상으로 유지하여 저류층 내에서 물만 유동되는 단상유동(single phase flow)의 조건에서 수행된다(Conway *et al.*, 1994; Clarkson and Bustin, 2011). 단상유동 조건에서 유정생산시험을 수행할 경우, 물의 유효투과도(effective permeability to water, k_w)는 CBM 저류층의 절대투과도와 같다고 볼 수 있으므로 물과 석탄층 메탄가스의 상대투과도를 고려할 필요가 없어 CBM 저류층 투과도 분석을 용이하게 할 수 있다.

3. 유정생산시험 분류 및 선정

3.1. CBM 유정생산시험 분류

CBM 저류층에 적용되는 유정생산시험에는 산출시험, 슬러그시험, 주입-배출시험 및 압력강하/상승시험 등이 있으나, 본 연구에서는 단상유동이 발생하는 조

건에서 수행 가능한 슬러그시험과 주입-배출시험으로 분류하고 특징 및 장·단점을 분석하였다(Table 1).

슬러그시험은 저류층에 순간적으로 물을 주입 또는 회수함으로써 시간에 따른 압력 거동을 측정하고, 이를 해석하여 저류층 물성인 절대투과도와 손상지수(skin factor, s)를 도출하는 유정생산시험으로 CBM 저류층에서 슬러그시험 수행 시 유체를 회수할 경우 저류층 압력이 임계탈착압력 이하로 감소될 수 있기 때문에 주입을 통한 슬러그시험이 더 선호된다(Seidle, 2011). 슬러그를 저류층으로 주입할 경우 초기 저류층 압력이 정수압보다 낮아야 하며, 일반적으로 유정자극법(well stimulation) 수행 전에 적용된다. 슬러그시험은 수행 장비 및 절차가 단순하고 취득된 자료에 대한 분석이 간단하다. 하지만 단상 유체 유동에 제한되어있고, 저류층의 투과도가 작을 경우 시험수행시간이 많이 소요되는 단점이 있다(Mavor and Saulsberry, 1996).

주입-배출시험은 물을 저류층으로 일정 시간동안 주입한 후 유정폐쇄(shut-in)하고 배출시험(falloff test)을

Table 1. Characteristics of well tests applicable in CBM

Well test method	Characteristics	Merits and demerits
Slug test	<ul style="list-style-type: none"> • Involves rapid addition or withdrawal of water but uses generally injection(Seidle, 2011) • Performed in reservoir where initial pressure is less than hydrostatic pressure for injection(Mavor and Saulsberry, 1996) • Can estimate absolute permeability and skin factor(Rushing <i>et al.</i>, 1991) • Undertaken prior to well stimulation (Halliburton, 2007) 	<ul style="list-style-type: none"> • Simple, easy to perform(Seidle <i>et al.</i>, 1991) • Unable to uniquely determine reservoir properties(Seidle, 2011) • Less than 30 ft of reservoir investigation radius and cannot determine a broad scope of reservoir properties(Seidle <i>et al.</i>, 1991)
Tank test	<ul style="list-style-type: none"> • Uses gravity drainage from a water storage tank to inject water into the reservoir in place of the pumping equipment normally used(Saulsberry, 1993) • Can estimate absolute permeability and skin factor(Saulsberry, 1993) • Can be performed in reservoir where the pressure gradient is less than 0.4 psi/ft(Aminian, 2006) 	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable to all reservoir regardless of pre- and post-simulated coal seam (Halliburton, 2007) • Reduced costs over the traditional injection falloff test(Saulsberry, 1993) • Longer test duration which will provide a greater investigation radius(Saulsberry, 1993)
IFT BFP-IFT	<ul style="list-style-type: none"> • Performed by injecting water into the formation at less than 0.01 bbl/min in order not to create fracture (Halliburton, 2007) • Requires at least four shut-in times for injection period(Halliburton, 2007) • Can estimate the permeability, skin factor and pore pressure(Halliburton, 2007) 	<ul style="list-style-type: none"> • Needs breakdown test before the test(Halliburton, 2007) • Not applicable to very low permeability coal(Halliburton, 2007)
DFIT	<ul style="list-style-type: none"> • Performed by injecting relatively small volume of water(Mayerhofer, 2012) • Can determine absolute permeability, fracture growth, fracture closure from reservoir(Taco <i>et al.</i>, 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> • No need for a breakdown test prior to the test(Halliburton, 2007) • Short test duration and cost-effective (Ramurthy <i>et al.</i>, 2002) • Unable to obtain quantitative skin factor(Halliburton, 2007)

수행함으로써 시간에 따른 압력 변화를 취득하여 저류층 물성을 분석하는 유정생산시험이다. 일반적으로 배출시험기간 동안 취득한 데이터를 기반으로 절대투과도, 손상지수 및 저류층 초기압력 등의 저류층 정보를 취득할 수 있다. 또한 유정자극법 전·후 모두 수행 가능하여 저류층 개선 정도, 균열절반길이(fracture half length) 및 균열전도도(fracture conductivity) 등의 추가적인 저류층 정보도 알 수 있다(Badri and Clare, 1996). 주입-배출시험의 경우 해석이 간편하고 상대투과도를 측정할 필요가 없다. 또한 유정생산시험 수행 시 미치는 영향반경이 크므로 슬러그시험보다 넓은 저류층 정보를 취득할 수 있어 석탄층에 적용되는 유정생산시험 중 가장 선호되고 있다(Hollub and Schafer, 1992; Seidle, 2011). 하지만 슬러그시험에 비해 비교적 많은 비용이 소요되며, 석탄층과 같은 낮은 투과도를 갖는 저류층에서는 물을 일정 유량으로 주입하기 어렵기 때문에 주입-배출시험 자료 분석시, 시험정의 유량을 일정하게 유지할 수 있는 배출 시험($q=0$)에서 얻어진 압력자료를 분석하여 저류층의 물성을 도출하는 것이 일반적이다(Semmelbeck and Lee, 1990).

Table 1에 나타난 것처럼 주입-배출시험에는 저류층

으로 물을 주입하기 위해 펌프(pump)를 사용하기보다 탱크를 이용하여 물의 중력배수원리(gravity drainage of water)로 수행되는 탱크시험(tank test)과 석탄층에 균열이 발생되지 않도록 낮은 주입유량으로 물을 주입함으로써 수행되는 BFP-IFT(below fracture pressure-injection falloff test) 및 석탄층 내에 균열이 발생했을 때 균열 복원 전 분석(before-closure analysis; BCA)과 균열 복원 후 분석(after-closure analysis; ACA)을 통해 저류층의 절대투과도와 균열 복원 압력(fracture closure pressure)을 측정할 수 있는 DFIT(diagnostic fracture injection test) 등이 포함된다.

3.2. CBM 유정생산시험 방법의 선정

CBM 저류층에 적합한 유정생산시험을 선택하기 위해서는 취득하고자 하는 저류층의 물성 및 계획된 생산조건 등 복잡한 영향인자가 고려되어야 한다. 그러나 영향인자의 복잡한 연결성 및 다양성으로 인해 현장자료 및 경험에 의존해 판단하기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 저류층 물성 및 압력구배, 유정자극법 수행여부와 메탄가스 생산여부 등의 저류층 정보를 이용하여 CBM 유정생산시험 기법을 선정하기 위한 의

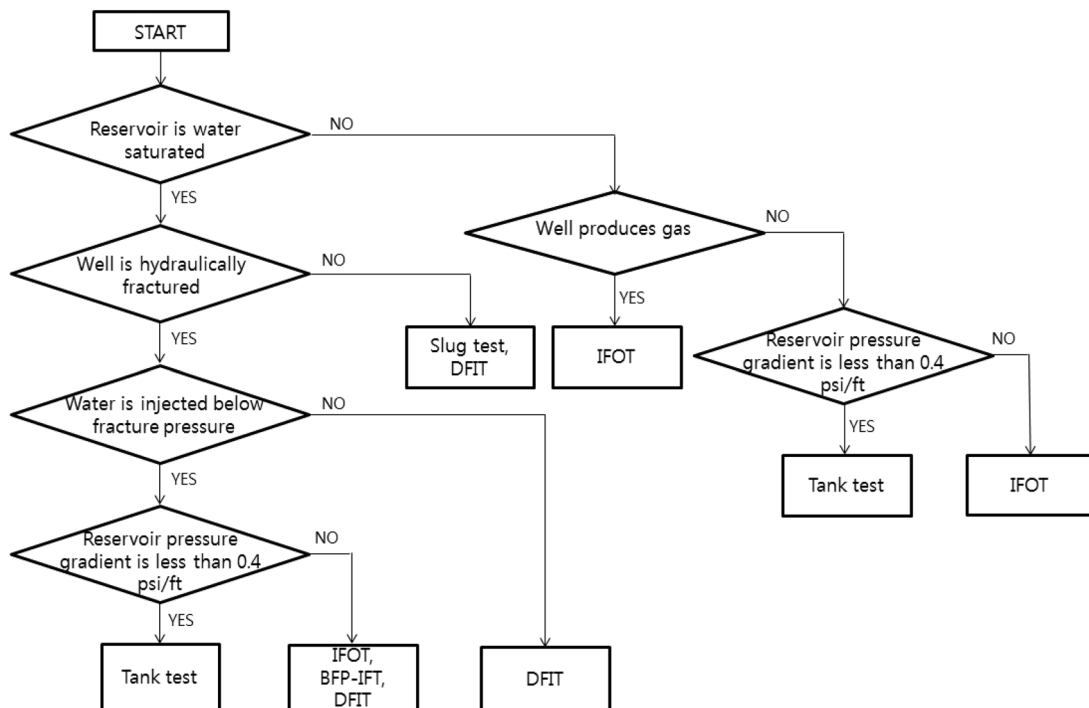


Fig. 2. Selection of well test applicable CBM reservoir(modified from Mavor and Saulsberry, 1996).

사결정 기준을 수립하고 이를 Fig. 2에 제시하였다. 제시된 기준은 복잡한 석탄층 구조 및 지층의 불균질성, 다상 유체 유동 및 응력 상태 등의 인자는 포함하고 있지 않으나, CBM 개발초기에 확인할 수 있는 석탄층의 특성인 물 포화 및 가스 생산 여부, 수압파쇄 등의 저류층 조건을 고려한 유정생산시험 방법 선정 가이드라인역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

4. CBM 유정생산시험 설계 및 수행절차 수립

4.1. 슬러그시험

4.1.1. 슬러그시험 설계방안

슬러그시험 설계시 물이 주입될 시험정 및 케이싱(casing)반경(r_c), 슬러그시험 수행시간, 저류층 영향반경 및 물 주입부피 등을 고려해야한다. 슬러그시험 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 시험정 및 케이싱 반경 결정이다. 반경이 큰 시험정을 사용할 경우, 물의 부피를 크게 설계해야하므로 수두가 안정화될 때까지 많은 시간이 소요되어 수행비용이 증가되고 반경이 작은 시험정을 사용할 경우, 적당한 부피의 물을 주입함으로써 슬러그시험 수행시간이 짧아져 수행비용이 감소된다. 하지만 슬러그시험 수행시간이 감소되면 저류층 영향반경까지 줄어들어 넓은 범위의 저류층 분석 자료를 취득할 수 없다. 따라서 슬러그시험을 통해 충분한 저류층 분석 자료를 취득할 수 있으면서 경제적으로 적합한 시험정 및 케이싱의 반경크기를 선택하는 것이 바람직하다. 시험정 및 케이싱의 반경이 결정되면 슬러그시험 수행시간(t_s)은 다음과 같이 추정된다(Mavor and Saulsberry, 1996).

$$t_s = \frac{43,700 \mu r_c^2}{kh} \quad (1)$$

여기서, μ 는 물의 점성도, h 는 슬러그시험이 수행되는 저류층의 두께이다. 식 (1)은 손상지수를 0으로 가정했을 때 적용되는 식으로 만일 손상지수가 0보다 크다면 t_s 를 좀 더 길게 설계하는 것이 바람직하다. 또한 설계된 t_s 에 따라 저류층 영향반경(r_s)도 다음 식을 통해 추정할 수 있다(Halliburton, 2007).

$$r_s = 0.029 \sqrt{\frac{kt_s}{\phi \mu c_i}} \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 CBM 저류층의 공극률이다. 물 주입부피는 물 주입 시 시험정내 수두가 0.5~3 ft 상승될 정도가 적당하며, 시험 중 압력의 변화를 측정하기위

해 설치되는 압력전송기(pressure transducer)에 영향을 미치지 않을 정도의 적당한 부피로 설계한다(Cunningham, 2010).

4.1.2. 슬러그시험 수행절차

슬러그시험을 수행하기 위해서는 우선적으로 저류층 초기상태(reservoir initial condition)에서 유정생산시험이 수행될 저류층 구간을 결정하고 외부와 단절 시켜야한다. 시험정이 나공(open-hole)일 경우 패커(packer)를 사용하여 시험 수행 구간을 고립시키고, 케이싱 설치공(cased-hole)에서는 물의 주입 및 배출이 케이싱 내부를 통해 수행되므로 시험정과 저류층간의 연결 상태를 확인해야한다. 시험정과 저류층간의 연결 상태가 불량할 경우 소규모의 균열을 발생시킴으로써 시험정과 저류층간의 연결을 증진시킨다(Mavor and Saulsberry, 1996).

다음 절차로 Fig. 3의 슬러그시험 모식도에서 나타난 것처럼, 압력전송기를 시험정내 초기 평형 수두(water equilibrium height)보다 더 깊은 곳에 설치한다. 이때 압력전송기를 너무 깊게 설치하게 되면 유체의 정수압이 압력전송기로 측정 가능한 압력범위를 초과할 수 있으므로 적당한 깊이에 설치되어야한다(Halliburton, 2007). 압력전송기가 설치된 후에는 시험정 초기 수두가 다시 평형상태로 될 때까지 기다린다. 평형상태에 도달되는 시간은 대상 저류층의 투과도에 따라서 몇 주간 지속될 수 있으며, 일정한 시간간격에

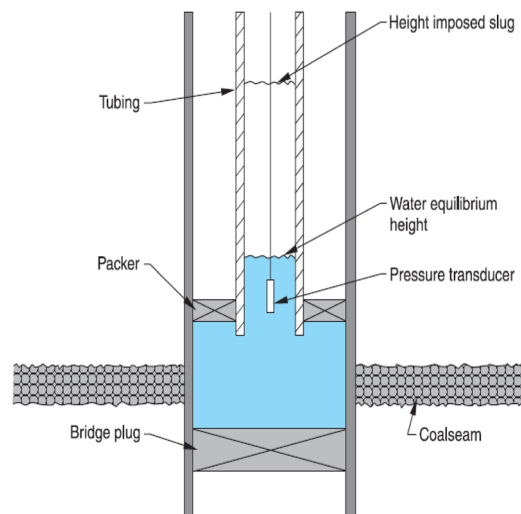


Fig. 3. Slug test(Halliburton, 2007).

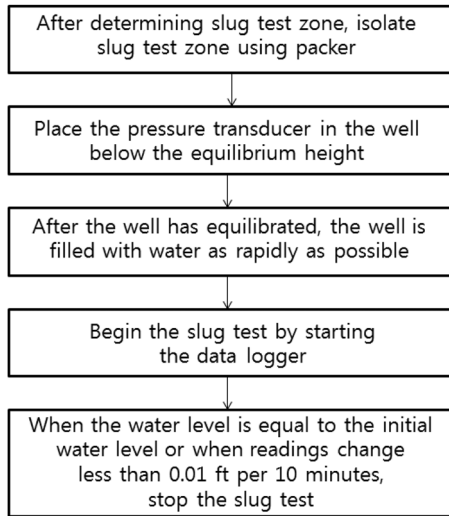


Fig. 4. Flow chart of slug test procedure(modified from Mavor and Saulsberry, 1996).

따라 시험정 초기수두변화를 전기적 심도측정기(electrical depth gauge)나 전기적 음향계(electrical sounder)를 이용하여 측정함으로써 추정할 수 있다(Hollub and Schafer, 1992).

시험정 초기수두가 평형상태에 도달되면 최대한 물을 신속히 주입한다. 만일, CBM의 투과도가 매우 낮다면 저류층 내의 공극이 불순물에 의해 쉽게 막힘 현상이 발생할 수 있기 때문에 순도가 보다 높은 물을 사용해야한다. 이후 유정 내에 설치했던 압력전송기를 즉시 작동시키고, 물을 주입한 후의 시험정 내 수두(height imposed slug)가 초기수두와 동일하거나 수두차가 10분당 0.01 ft이하로 기록될 때까지 데이터 기록장비를 작동 시키면 슬러그시험은 종료되며, Fig. 4에 도출된 슬러그시험 수행절차를 개략적으로 제시하였다.

4.2. 주입-배출시험

4.2.1. 주입-배출시험 설계방안

주입-배출시험 설계 시 주입-배출시험 수행시간 추정, 저류층 영향반경 및 물 주입압력과 주입유량 등을 고려해야한다. 이 중 가장 중요한 요소는 물 주입유량을 결정하는 것으로 이는 주입-배출시험시간과 물 최대 주입압력에 따라 결정된다(Semmelbeck and Lee, 1990).

주입-배출시험 수행시간은 저류층 영향반경을 계산할 수 있고, 주입-배출 시험 수행 후 자료 분석 시 로그-로그 그래프(log-log plot)에서 Fig. 8과 같이 시추

정저장효과구간(wellbore storage effect period)이 끝난 후 압력천이구간(pressure transient period)과 방사상유동구간(radial flow period)을 포함하는 무한거동구간(infinite acting period)이 나타날 정도로 길게 설계되어야한다(Saulsberry, 1993). 또한 일반적으로 저류층 물성은 무한거동구간에서 취득한 자료를 통해 분석되므로 시추정저장효과구간이 짧고 무한거동구간이 길수록 분석이 용이하다. 따라서 무한거동구간이 시작되는 시점(t_{wbs})을 추정하는 것이 중요하며, 주입 및 배출 시간에서의 t_{wbs} 는 다음 식으로부터 계산된다.

$$t_{wbs(i)} = \frac{(200,000 + 12,000s)C}{kh/\mu} \quad (3)$$

$$t_{wbs(f)} = \frac{170,000C e^{0.14s}}{kh/\mu} \quad (4)$$

$$C = C_{wb} V_{wb} \quad (5)$$

여기서 $t_{wbs(i)}$ 는 주입시간에서의 t_{wbs} 이며, $t_{wbs(f)}$ 는 배출시간에서의 t_{wbs} 이다. C 는 시추정저장계수(wellbore storage coefficient)로 평균 시추정 유체 압축률(average wellbore fluid compressibility, C_{wb})과 시추정 부피(V_{wb})의 곱이다. 또한 식 (3), (4)에서 투과도(k)와 손상지수(s)는 지질조사자료 또는 슬러그시험을 먼저 수행하여 취득한 값이나 가정된 값을 사용한다(Mavor and Saulsberry, 1996).

$$t_{total(i)} = 3t_{wbs} \quad (6)$$

여기서, c_t 는 총 압축률(total compressibility)을 나타낸다. 총 주입 및 배출 시험시간($t_{total(i)}$)은 식(6)과 같이 각 t_{wbs} 의 3배로 추정할 수 있으며, 보통 주입시험시간은 배출시험시간보다 더 길게 설계된다(Seidle et al., 1991).

$$r_i = \left[\frac{3t_{total(i)}}{237\phi\mu c_t} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

주입-배출시험 시간이 결정되면 식 (7)로부터 물 주입 시 저류층 영향반경(r_i)을 추정할 수 있다(Semmelbeck and Lee, 1990). 저류층 영향반경이 잘못 설계되면 주입-배출시험 수행비용이 증가될 뿐 아니라, 저류층 전체를 대표할 수 없는 투과도로 측정되어 저류층 물성 값에 오차가 발생되므로 적절한 영향반경을 설정할 수 있도록 세심한 설계가 요구된다. 물 최대주입압력(maximum injection pressure, P_{max})은 저류층에 균열이 발생되지 않도록 석탄층 균열 압력의 75%

이하로 설계되며, 이 때 균열 압력은 대상층의 시료를 통해 암석 강도실험을 하거나, 대상층 주변에 존재하는 석탄층 메탄가스정의 파쇄 압력 구배(fracture gradient)를 통해 유추한다. 만약 P_{max} 가 석탄층 균열 압력보다 높게 설정되면 석탄층 내에 균열이 발생되어 정확한 투과도 분석 결과값을 취득하지 못할 뿐 아니라 주입시험기간과 배출시험기간에 방사상유동이 나타나지 않아 주입-배출시험을 통한 저류층 물성을 분석할 수 없다. 따라서 저류층에 균열이 발생되지 않을 정도로 낮은 주입압력으로 주입-배출시험을 수행해야 하며, P_{max} 가 결정되면 t_{total} 와 물 용적 계수(water formation volume factor, B_w)를 다음 식에 대입하여 물 주입유량(q)을 추정할 수 있다(Gu *et al.*, 1993).

$$q = \frac{P_i - P_{max}}{\frac{70.6 B_w \mu}{kh} \left[\ln \left(\frac{1688 \phi \mu c r_w^2}{k t_{total}(t)} \right) - 2s \right]} \quad (8)$$

여기서 P_i 는 평균 저류층 초기 압력이며, r_w 는 시추정의 반경이다.

4.2.2. 주입-배출시험 수행절차

주입-배출시험은 케이싱 설치공에서 수행되며, 주입-배출시험이 수행될 구간을 설정한 후 Fig. 5와 같이

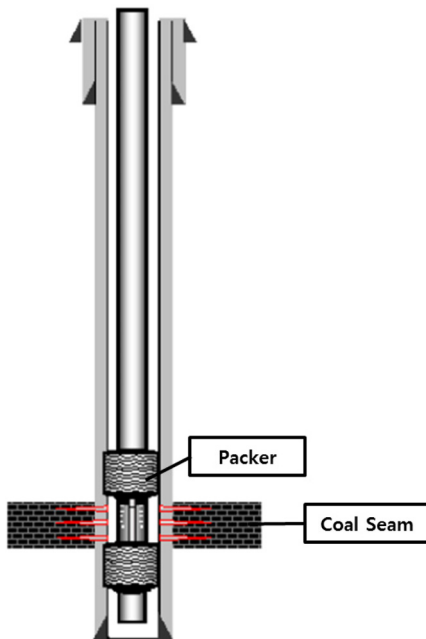


Fig. 5. Injection falloff test(ExxonMobil Exploration, 2011).

1ft당 4~8회 정도로 천공하여 시추정과 저류층을 연결한다. 만약 시추정과 저류층의 연결이 불량하다면, 저류층에 짧은 기간 동안 물을 1-3 bbl/min 정도로 주입하여 약간의 균열을 발생시키는 브레이크다운 시험(breakdown test)을 수행함으로써 시추정과 저류층간의 연결성을 증진시키고, 시험 수행 후에는 저류층의 압력이 원래대로 돌아올 때까지 약 1-2시간동안 유정을 폐쇄해야한다(Hopkins *et al.*, 1998). 시추정과 저류층간의 연결성이 확인되면 패커를 이용하여 저류층을 외부로부터 고립시킨 다음 설치된 패커 아래에 압력계측기(pressure gauge)를 장착한다. 추가적으로 0.08-0.13 ft의 비교적 작은 직경의 시험정을 사용하거나 공저 폐쇄 밸브(downhole shut-in valve)를 사용하면 시추정저장효과구간을 감소시킬 수 있어 주입-배출 시험 수행 후 취득한 자료 분석을 통한 저류층 물성 취득의 질을 높일 수 있다(Saulsberry, 1993). 주입-배출 시험 수행에 있어서 가장 중요한 절차로 저류층 내에 균열이 발생되지 않도록 유의하면서 시험정 내부로 주입-배출 시험 수행 전 설계단계에서 설정해두었던 물 주입압력과 주입유량에 맞추어 물을 저류층내로 목표 시간까지 주입하며 보통 0.02-0.05 bbl/min 정도의 유량으로 물이 주입된다(Zuber *et al.*, 1990). 설계에 맞추어 물이 주입되면 밸브를 닫아 유정을 폐쇄하고 압력이 안정화 될 때까지 배출시험을 수행한 후 주입-배

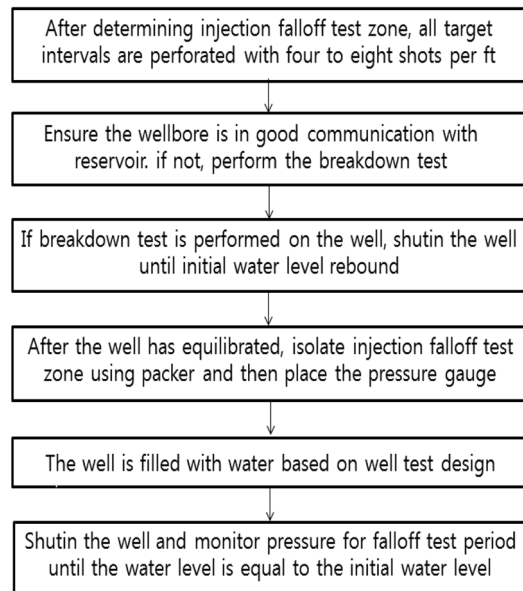


Fig. 6. Flow chart of injection falloff test procedure (modified from Zuber *et al.*, 1990).

출시험이 종료되며, Fig. 6에 도출된 주입-배출시험의 설계절차를 나타내었다.

5. 자료분석을 통한 저류층 물성 도출 절차 수립

5.1. 슬러그시험 분석을 통한 저류층 물성 도출

슬러그시험 수행 시 취득한 유정생산시험 자료는 Ramey *et al.* (1975)에 의해 제시된 표준곡선중첩법(type curve matching)을 통해 분석된다. Fig. 7의 Ramey *et al.* (1975)의 그래프는 무차원 시간(dimensionless time, t_D)을 무차원시추정저장계수(dimensionless wellbore storage coefficient, C_D)로 나눈 값에 따른 무차원 압력(dimensionless pressure, P_D)을 나타낸 것으로 슬러그시험 수행 후 취득된 압력($p(t)$), 시간(t) 및 시추정 저장계수(C)의 자료를 다음의 세 식과 같이 무차원의 형태로 변환해야한다(Mavor and Saulsberry, 1996).

$$P_D = \frac{p(t) - p_i}{p_0 - p_i} \quad (9)$$

$$t_D = \frac{2.637(10^{-4})kt}{\phi\mu c r_w^2} \quad (10)$$

$$C_D = \frac{5.615C}{2\pi\phi c h r_w^2} \quad (11)$$

식 (9)에서 p_i 는 유체를 주입하기 전에 측정된 압력이며, p_0 는 시험중에 유체를 주입하고 가장 최대의 압력을 기록 했을 때의 압력으로 이때 측정된 시간을 0 으로 조절하여 압력변화가 측정된다. 따라서 식 (10)에서의 t 는 조정된 시간을 의미한다. 식 (9), (10), (11)로부터 무차원 변수가 계산되면, 무차원압력(P_D)과 슬러그시험 수행시간 변화(Δt)를 Fig. 7과 같이 세미로그 그래프(semi-log plot)에 도시한 후 Fig. 7에 중첩시킴으로써 Δt 에 중첩되는 $(t_D/C_D)_{match}$ 를 추정한다(Ramey *et al.*, 1975).

$$k = \frac{\left(\frac{t_D}{C_D}\right)_{match} 603.5\mu C}{(\Delta t) h} \quad (12)$$

$$s = \frac{1}{2} \ln \frac{(C_D e^{2s})_{match}}{C_D} \quad (13)$$

여기서 Δt 는 슬러그시험 수행시 시간변화값이다. 추정된 $(t_D/C_D)_{match}$ 를 식 (12)에 대입하면 CBM 저류층

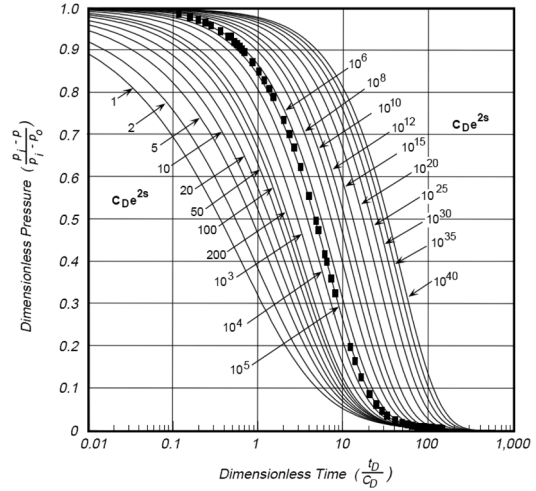


Fig. 7. Slug test analysis using Ramey's type curve(Ramey *et al.*, 1975).

의 절대투과도를 도출할 수 있으며, Fig. 7에서 $(t_D/C_D)_{match}$ 과 P_D 에 중첩되는 $(C_D e^{2s})_{match}$ 값을 식 (13)에 대입함으로써 최종적으로 손상지수를 측정할 수 있다.

5.2. 주입-배출시험 분석을 통한 저류층 물성 도출

주입-배출시험은 유체의 생산이 아니라 주입에 의해 수행되므로 유량을 좀 더 정확하게 조절할 수 있다. 따라서 일정 유량에 따른 압력이 측정되기 때문에 유정생산시험을 통해 도출된 결과가 슬러그시험에 비해 더 정확하다. 또한 석탄층에 유체를 낮은 압력으로 주입하여 저류층 압력을 임계탈착압력 아래로 떨어뜨리지 않아 가스가 생산되지 않으므로 단상유체에 대한 분석이 가능하다(Saulsberry, 1993).

주입-배출시험 분석은 Fig. 8과 같이 배출시험기간 중에 나타나는 압력 거동 취득 자료를 압력미분곡선분석법(pressure derivative curve analysis method)에 적용하여 이루어지며, 압력미분곡선분석법은 CBM 저류층과 같은 불균질성 저류층에서 유동 형태 및 저류층 특성 파악을 비교적 용이하게 하여 유정생산시험 분석시 많이 활용된다. Fig. 8은 시간에 따른 압력변화(pressure change)와 압력미분변화(pressure derivative change)를 로그-로그 그래프에 도시한 것으로 이를 해석함으로써 절대투과도와 손상지수를 도출할 수 있다(Bourgeois and Horne, 1993).

$$k = 70.65 \frac{q_w \mu_w B_w}{h m'} \quad (14)$$

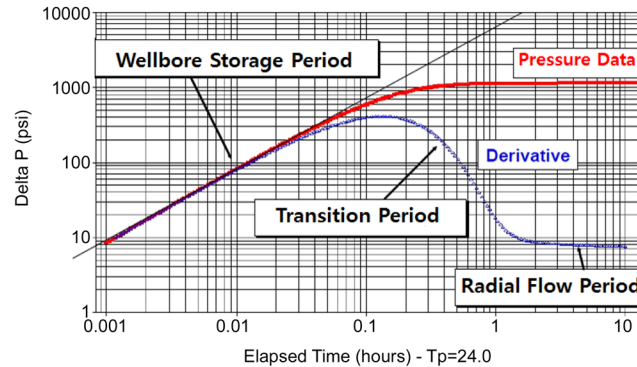


Fig. 8. Example of log-log plot for fall off period(Johnson and Lopez, 2003).

$$s = 1.151 \left[\frac{P_{1hr} - P_{wf}}{2.303 m'} \log \frac{k}{\phi \mu c_r r_w^2} + 3.227 \right] \quad (15)$$

식(14)에서 q_w 는 지표로부터 회수되는 물의 양을 의미하며, μ_w 는 물의 점성도이다. 또한 식 (15)에서 P_{wf} 는 유정폐쇄 후 안정화된 공저압력이다. 절대투과도의 경우, Fig. 8에서 압력미분변화 그래프의 기울기가 0으로 나타나는 구간 즉, 석탄층 내에서 시추정저장효과가 종료되고 무한거동구간 중 방사상유동구간에서 안정화된 압력미분값 m' 를 추정하여 식 (14)에 대입함으로써 측정할 수 있다. 또한 식 (14)를 통해 추정된 절대투과도를 식 (15)에 적용함으로써 손상지수를 계산할 수 있다.

6. 결론 및 제언

본 연구에서는 CBM 저류층에 적용 가능한 유정생산시험을 분류하고, 유정생산시험 설계 시 고려사항에 입각하여 수행절차를 수립하였다. 또한 유정생산시험 수행 후 취득된 자료의 해석법에 대해 고찰하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. CBM 저류층에 적용되는 유정생산시험은 슬러그 시험과 주입-배출시험으로 분류되며 석탄층 특성에 따른 유정생산시험 선정기준이 제시되었다.
2. 슬러그시험의 경우, 설계단계에서 시험정 및 케이싱 반경 크기, 물 주입부피, 슬러그시험 수행시간 및 저류층 영향반경 등을 고려해야하며, 슬러그시험은 이에 준수하여 수행되어야 한다. 슬러그시험에서 취득한 자료는 표준곡선중첩법을 통해 분석되고, 이로써 절대투과도와 손상지수를 추정할 수 있다.
3. 주입-배출 시험의 경우, 주입-배출시험 수행시간,

저류층 영향반경 및 물 주입압력과 주입유량 등을 고려하여 설계되며, 저류층에 균열이 발생되지 않도록 설계한 물 주입압력 및 주입유량을 기준으로 수행되어야 한다. 수행 후 취득된 결과를 압력미분곡선분석법에 적용하여 분석하면, 저류층의 절대투과도와 손상지수를 추정할 수 있다.

본 연구에서 수립된 유정생산시험 설계 및 수행절차는 국내에서 CBM 개발 사업 진출 시 활용되어 CBM의 생산성을 파악하는 가이드라인 역할을 할 것으로 판단된다.

부 호

B_w	water formation volume factor, bbl/stb (use 1.0)
c_t	total compressibility, psi^{-1}
C	wellbore storage coefficient, bbl/psi
C_D	dimensionless wellbore storage coefficient for the slug test, bbl/psi
C_{wb}	average wellbore fluid compressibility, psi^{-1}
h	effective thickness of the reservoir being tested, ft
k	absolute permeability, md
m'	stabilized derivative value, psi
P_i	initial average reservoir pressure, psi
P_o	pressure at time zero, psi
$p(t)$	pressure at slug duration, psi
P_D	dimensionless pressure for the slug test, hrs
P_i	initial injection pressure, psi

P_{\max}	maximum injection pressure, psi
P_{1hr}	pressure extrapolated back to an equivalent time of 1 hour, psi
P_{wf}	wellbore flowing pressure at shut-in, psi
q	injection rate, bbl/day
q_w	surface water production rate, bbl/day
r_i	reservoir investigation of injection test, ft
r_c	radius of tubing or casing which slug test is performed through, ft
r_s	reservoir investigation of slug test, ft
r_w	radius of the wellbore, ft
s	formation skin factor
t_D	dimensionless time for the slug test, hrs
$t_{total(i)}$	total injection duration, hrs
$t_{wbs(i)}$	time at the end of the wellbore storage period for falloff test, hrs
t_s	slug test duration, hrs
$t_{wbs(i)}$	time at the end of the wellbore storage period for injection test, hrs
$(t_D/C_D)_{match}$	dimensionless time match point
Δ_t	time change for slug test, hrs
V_{wb}	wellbore volume, bbl
μ	water viscosity at reservoir conditions, cp
ϕ	porosity

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 부처임무형 사업인 “인도네시아 석탄층 메탄가스 생산 및 평가기술 개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Aminian, K. (2006) Evaluation of Coalbed Methane Reservoirs. Petroleum & Natural Gas Engineering Department, West Virginia University, USA. p.1-14.
- Arenas, A.G. (2004) Development of Gas Production Type Curves for Coalbed Methane Reservoirs. MS Thesis, West Virginia University, USA, p.1-84.
- Association for the Study of Peak Oil & GAS (ASPO). (2009) http://aspoirelandfiles.wordpress.com/2009/12/newsletter100_200904.pdf.
- Badri, M. and Clare, R. (1996) New Developments in Testing Procedure for Coalbed Methane Wells in Australia. Asia Pacific Oil and Gas Conference, Society of Petroleum Engineers, Adelaide, Australia, October 28-31, p.191-205.
- Bourgeois, M.J and Horne, R.N. (1993) Well-Test-Model Recognition Using Laplace Space. SPE Formation Evaluation, v.8, p.17-25.
- Clarkson, C.R. and Bustin, R.M. (2011) Coalbed Methane: Current Field-Based Evaluation Methods. Jour. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, v.14, p.60-75.
- Conway, M.W, Mavor, M.J., Saulsberry, J., Barree, R.B. and Schraufnagel, R.A. (1994) Multi-Phase Flow Properties for Coalbed Methane Wells: A Laboratory and Field Study. Low Permeability Reservoirs Symposium, Society of Petroleum Engineers, Denver, Colorado, March 19-22, p.313-326.
- Cunningham, M.L. (2010) Technical Procedures of the U.S. Geological Survey, p.145-151.
- ExxonMobil Exploration. (2011) Coal Bed Methane (CBM) Permeability Testing. WTN Network Meeting, ExxonMobil, April 28-29, p.4.
- Gu, H., Elbel, J.L., Nolte, K.G. and Abousleiman, Y. (1993) Formation Permeability Determination Using Impulse-Fracture Injection. SPE Production Operations Symposium, Oklahoma, Oklahoma City, Mar. 21-23, p.189-201.
- Halliburton (2007) Coalbed Methane: Principles and Practices. Halliburton, Houston, p.196-209.
- Holditch, S.A. and Madani, H. (2010) Global Unconventional Gas-It Is There, But Is It Profitable. Jour. Petroleum Technology, v.62, p.42-49.
- Hollub, V.A. and Schafer, P.S. (1992) A Guide to Coalbed Methane Reservoir Operations. Gas Research Institute, Chicago, p.315-329.
- Hopkins, C.W, Frantz, J.H., Flumerfelt, R.W. and Spivey, J.P. (1998) Pitfalls of Injection/Falloff Testing in Coalbed Methane Reservoirs. SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, March 23-26, p.9-24.
- Huh, D.G. and Lee, J.H. (2010) Unconventional Hydrocarbon Resources of the Next-generation Energy Era. Jour the Korean Society for Geosystem Engineering, v.47, p.978-981. (in Korean)
- International Energy Agency (IEA) (2012) World Energy Outlook 2012. IEA.
- Jang, H.C. and Lee, J.H. (2013) A Study on the Well Test Analysis of Coalbed Methane Using the BFP-IFT. Jour. the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering, v.50, p.348-357. (in Korean)
- Johnson, K. and Lopez, S. (2003) The Nuts and Bolts of Falloff Testing. U.S. Environment Protection Agency. Kansas Geological Survey (KGS) (2006) Integrated Sub-surface Carbon Sequestration and Enhanced Coalbed Natural Gas Recovery using Cement Kiln Emissions. Energy Research Reports.
- King, G.R. and Ertekin, T. (1989) A Survey of Mathematical Models Related to Methane Production from Coal Seams: Part I, Equilibrium Sorption Models. Coalbed Methane Symposium, Alabama, Tuscaloosa, April 17-20, 125p.
- Ko, H.J., Ko, D.C., Ki, W.S., Kim, J.H., Kim B.C., Kim T.H., Park, S.H., Park, I.H., Yum, B.W., Lee, S.G., Lee,

- S.R., Choi, B.Y. and Hwang, S.H. (2008) Exploration of Coalbed Methane. The Ministry of Knowledge Economy. Final Report. (in Korean)
- Lee, J.H. (2011) Development Status and Industrial Prospect of Unconventional Gas Resources. Jour. the Korea Gas Union, Autumn, p.43-52. (in Korean)
- Mahendra, S.K. (1997) Pressure Transient Testing in Coalbed. MS Thesis, Texas Tech University, USA.
- Mavor, M.J. and Saulsberry, J.L. (1996) A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering. Gas Research Institute, Chicago, p.149-265.
- Mayerhofer, M. (2012) DFIT(Diagnostic Fracture Injection Test) SWPLA Meeting. Halliburton.
- Mora, C.A. and Wattattenbarger, R.A. (2007) Comparison of Computation Methods for CBM Performance. Canadian International Petroleum Conference, Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, June 12-14, p.1-2.
- Ramey, H.J., Agarwal, R.G. and Martin, I. (1975) Analysis of "Slug Test" or DST Flow Period Data. Jour. Canadian Petroleum Technology, v.14, p.37-47.
- Ramurthy, M., Marjerisson, D.M. and Daves, S.B. (2002) Diagnostic Fracture Injection Test in Coals to Determine Pore Pressure and Permeability. SPE Gas Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, April 30-May 2, p.1-16.
- Rushing, J.A., Blasingame, T.A., Poe, J.R., Brimhall, R.M. and Lee, W.J. (1991) Analysis of Slug Test Data From Hydraulically Fractured Coalbed Methane Wells. SPE Gas Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers, Huston, Texas, January 22-24, p.105-118.
- Saulsberry, J.L. (1993) Cost Reduction of Injection Tests for Under-Pressured Reservoirs. SPE Gas Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers, Calgary, Alberta, June 28-30, p.597-610.
- Seidle, J. (2011) Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering. Penn Well Corporation, Tulsa, p.185-194.
- Seidle, J.P., Kutas, G.M. and Krase, L.D. (1991) Pressure Fall-off Tests of New Coal Wells. Low-Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, April 15-17, p.53-62.
- Semmelbeck, M.E. and Lee, W.J. (1990) Well Test Requirements for Evaluation of Coalbed Methane Development Potential. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, New Orleans, Louisiana, September 23-26, p.521-531.
- Taco, G., Kamenar, A. and Edgoose, J. (2012) Comparison of DFIT, DST and IFT Permeabilities in CBM Reservoirs. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, Perth, Australia, October 22-24, p.1-13.
- Zuber, M.D., Sparks, D.P. and Lee, W.J. (1990) Design and Interpretation of Injection/Falloff Tests for Coalbed Methane Wells. The 65th Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, New Orleans, Louisiana, September 23-26, p.427-428.

2013년 5월 20일 원고접수, 2013년 07월 23일 1차수정,
2013년 8월 11일 게재승인