



생산자료를 이용한 캐나다 CBM 원시부존량 평가 연구

서형준 · 문상호* · 김기홍** · 한정민** · †권순일

동아대학교 에너지자원공학과, *MKS Investments Ltd., **한국가스공사 연구개발원
(2017년 9월 13일 접수, 2018년 2월 20일 수정, 2018년 2월 21일 채택)

A Study on Estimation of Initial Gas in Place for Coalbed Methane Field Using Production Data at Canada

Hyeongjun Seo · Bryan Moon* · Kihong Kim** · Jungmin Han** · †Sunil Kwon

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

*MKS Investments Ltd. Canada

**Gas Resources Technology Center, Kogas Research Institute

(Received September 13, 2017; Revised February 20, 2018; Accepted February 21, 2018)

요약

Horseshoe Canyon 석탄층 메탄가스 광구 4개 생산정의 생산이력과 압력 시험자료를 바탕으로 물질평형법과 감퇴곡선법을 이용하여 원시부존량을 예측하는 연구를 수행하였다. 물질평형법은 전통가스 물질평형법과 Jensen and Smith법을 이용하였고, 감퇴곡선법은 Arps 경험식과 Khaled 법을 이용하였다. 그 결과, 전통가스 물질평형법과 Jensen and Smith법을 이용한 경우의 차이는 12% 이내로 부존량 예측에 큰 차이는 없고, 감퇴곡선법을 적용한 경우, 감퇴지수가 1이상, 최대 3.5에 이르러, Arps 방정식을 이용하면 부존량이 무한대로 산출되므로 Khaled 법을 적용하는 것이 적절하였다. 전통가스 물질평형방정식을 이용한 부존량 예측 결과와 Khaled 법을 이용한 예측 결과의 차이는 8.67% ~ 31.04% 였고, Jensen and Smith 방정식과 Khaled 법을 이용한 부존량 예측 결과의 차이는 13.67% ~ 26.49%로 후자의 경우가 차이가 더 적었다.

Abstract - This paper presents the prediction of the original gas in place(OGIP) by using the material balance method and decline curve analysis method with production history and pressure transient test data for four coalbed methane wells in the Horseshoe Canyon field. In this study, the conventional gas equation and the Jensen and Smith(J&S) equation were used to material balance analysis, and the Arps' empirical correlation and Khaled method were applied to decline curve analysis. From the results, the OGIP estimated from the conventional gas and the J&S method was small in difference as under 12%. Also, in case of decline curve analysis, it was found that the Khaled method has appropriated to calculate the OGIP, because the OGIP was estimated as unlimited value by the Arps' equation from the decline exponent of 1 - 3.5. The OGIP difference between conventional gas method and Khaled method was calculated as 8.67% ~ 31.04%, and those between J&S method and Khaled method was 13.67% ~ 26.49%.

Key words : horseshoe canyon coalbed methane field, original gas in place, material balance method, decline curve analysis method

†Corresponding author:sikwon@dau.ac.kr

I. 서론

캐나다 천연가스 생산은 지역적으로 매우 큰 차이를 보이는데, 캐나다 서부의 브리티시 콜롬비아(British Columbia), 앨버타(Alberta), 사스카치완(Saskatchewan)주에 걸쳐 있는 서부캐나다퇴적분지(Western Canadian Sedimentary Basin, WCSB)는 캐나다 최대의 천연가스 매장지역이며 생산 중심지이다. 캐나다 오일, 가스 총 생산량의 약 80%를 차지하는 서부캐나다퇴적분지는 전통 원유, 오일샌드, 전통 천연가스, 세일가스, 석탄층 메탄가스(coalbed methane, CBM) 등 다양하고 풍부한 탄화수소 자원이 매장되어 있다. 특히 이 분지의 매장량은 약 84 Tcf(trillion cubic feet)이며 연간 캐나다 천연가스 생산량 5.4 Tcf 가운데 98%를 차지하고 있다.

캐나다의 CBM 부존량은 700 Tcf 이상일 것으로 추정되며, 그 중 80%에 달하는 양이 유라기(Jurassic), 백악기(Cretaceous) 지질시대의 서부캐나다퇴적분지에 매장되어 있고, 석탄층의 특성에 따라 Scollard, Horseshoe Canyon, Belly River층과 Manville층 등으로 구분된다[1]. 2000년대 이후로 서부 퇴적분지를 중심으로 3,000개 이상의 시추가 실시되었고, 2005년 기준으로 하루 150 MMcf (million cubic feet)를 생산하였다[2].

CBM 광구의 생산량을 예측하고 이에 따른 매장량을 평가하여 생산 계획을 수립하고 경제성을 평가하는 것은 광구를 성공적으로 운영하기 위하여 매우 중요한 핵심 기술이다. 일반적으로 매장량 산출법은 크게 확률론적(probabilistic) 방법과 결정론적(deterministic) 방법으로 구분된다. 확률론적 방법은 석유발견 이전의 불확실성이 큰 단계에서 매장량을 계산할 때 주로 사용된다. 결정론적 방법은 탐사 후기 또는 개발 및 생산단계의 시점에서 주로 이용하는 방법이며, 저류층 변수들에 대한 하나의 대표값 들을 이용하여 매장량을 계산한다. 결정론적 방법에 의한 매장량 산출법에는 탐사, 개발, 생산단계에 따라 유추법(analogy method), 부피법(volumetric method), 생산추이분석법(production performance analysis method)이 있다.

생산추이분석법은 유정이나 가스정에서 생산된 생산자료로부터 충분히 신뢰할만한 저류층 특성 자료가 존재하는 경우에 이용되는 방법이다. 즉, 이 방법은 실제 생산된 자료를 이용하여 매장량을 계산하는 방법으로서, 물질평형법(material balance method, MBM), 생산감퇴곡선분석법(decline curve analysis method, DCA), 저류층시물레이션(reservoir simula-

tion method)이 있다. 물질평형법과 저류층시물레이션법은 개발이나 생산단계에 관계없이 이용될 수 있으나, 생산감퇴곡선분석법은 생산이 진행된 후 생산감퇴단계에 있는 저류층에 대해 간편하게 현장에서 적용할 수 있다[3]. 또한, 생산추이분석법은 접근할 수 있는 자료의 양에 따라 정확도의 차이를 보이는데 일반적으로 운영권자이거나 타 회사 보유광구를 매입하는 경우, 광구에 대한 충분한 자료를 확보할 수 있으므로 히스토리매칭(history matching)을 수행한 저류층시물레이션에 의해 정확한 매장량 평가를 수행할 수 있다. 그러나 많은 수의 광구를 대상으로 한 초기 검토단계에서는 충분한 자료를 확보하기 어렵기 때문에 제한된 생산자료만을 이용하여 매장량을 평가할 수 있는 물질평형법이나 감퇴곡선법을 이용하는 것이 정확도를 높일 수 있다. 물질평형법과 생산감퇴곡선분석법은 원시부존량을 먼저 예측하고 경제적, 기술적으로 생산이 불가능한 저류층 압력(abandonment pressure)이나 일일생산량(production rate)을 토대로 매장량을 계산하게 된다. 따라서 매장량 평가에 선행하여 또는 동시에 원시부존량 평가가 이루어져야 한다.

본 연구는 초기 검토단계에서 매장량 평가 방법을 제안하는 것이 목적이기 때문에 Accumap 소프트웨어를 이용하여 라이선스를 가진 누구나 취득할 수 있는 생산자료를 가지고 원시부존량 평가를 수행하였다. 이런 이유로 제한된 생산자료에 근거하여 평가가 가능하고 예측의 정확성이 높은 물질평형법과 감퇴곡선법을 이용하여 Horseshoe Canyon CBM 광구에 대해 생산성을 예측하고 원시부존량을 산출하였다. 또한 두 방법에 의한 부존량 평가를 비교, 분석하여 Horseshoe Canyon CBM 생산광구의 부존량 평가 방법을 제안하였다.

II. 본론

1. 물질평형법을 이용한 부존량 분석

물질평형법은 기본적으로 저류층을 하나의 작은 탱크로 가정하고, 탱크 내에서 오일, 가스, 물 등 유체의 종류에 관계없이 단상(single phase) 유동을 가정한다. 저류층 내의 생산정이나 주입정의 수 또는 저류층의 외곽 경계 조건(단층이나 대수층)과 관계없이 탱크 내로 유입된 유체와 탱크 외부로 유출된 유체의 질량보존법칙에 기초하여 물질평형방정식이 유도된다. 이 물질평형방정식으로부터 탱크 전체의 평균 압력이나 부존량 및 생산성 분석이 이루어진다.

가스 저류층에 적용되는 가스 물질평형방정식은 질량보존의 법칙에 근거한다. 즉, 생산된 가스량의

무게는 저류층에 초기 존재한 가스의 무게와 저류층에 남아있는 가스의 무게로 계산할 수 있다. 이 관계식을 가스의 몰수에 근거한 몰 평형관계로 나타낸 후 실제가스의 상태방정식(equation of state for real gas law)을 적용하고, 물 불출입 가스 저류층(volumetric gas reservoir)을 가정하여 가스용적인자(formation volume factor)를 대입하면 아래와 같은 물질평형방정식(식 (1))을 유도할 수 있다.

$$\frac{p}{z} = - \left(\frac{p_i}{z_i} \frac{1}{G} \right) G_p + \frac{p_i}{z_i} \quad (1)$$

여기서 p : 저류층 압력, psia
 z : 가스압축인자
 p_i : 저류층 초기압력, psia
 z_i : 저류층 초기조건에서 가스압축인자
 G : 원시부존량(Original Gas In Place, OGIP), scf
 G_p : 누적생산량, scf

이 식을 p/z vs. G_p 그래프에 도시하면 경사 $-\left(\frac{p_i}{z_i} \frac{1}{G}\right)$ 와 y 축 절편 $\frac{p_i}{z_i}$ 를 갖는 직선으로 나타난다. 이 식에서 p/z 가 0 일 때, G_p 는 G 가 되어 원시부존량이 된다. 따라서 가스장에서 취득한 생산량 및 압력자료를 그래프 상에서 직선으로 도시한 후 이 직선을 p/z 가 0인 x 축까지 연장하면 가스전의 원시부존량을 구할 수 있다. 또한, 생산에 의해 압력이 특정 압력까지 강하했을 때 누적생산량을 예측할 수 있고 이에 대한 회수율을 계산할 수 있다. 마지막으로 상업적 혹은 기술적 포기압력을 설정하고 이때 누적생산량을 구하면 이것이 매장량이 된다[3].

앞에서 설명하였듯이 물질평형방정식은 주어진 저류층에 대하여 탄화수소 원시부존량, 일정 저류층 압력에서 누적생산량, 매장량을 예측하기 위하여 사용되어 왔다. 이러한 물질평형방정식은 CBM 저류층에도 적용될 수 있는데, 이 경우에는 1) 석탄과 가스는 반응하지 않음, 2) 등온 압력감퇴, 가스가 석탄 모암(matrix)을 충전, 3) 가스유입 없음, 그리고 4) 단상 가스 유동 등의 4가지를 가정한다. 이론적으로 생산된 가스의 양은 원시부존량과 잔존가스의 차이로 계산할 수 있다. 그러나, CBM 저류층은 가스가 석탄 모암 표면에 흡착되거나 석탄의 클리트(cleat) 내에 자유가스 형태로 존재하게 되므로, 가스 물질평형방정식은 다음과 같이 수학적으로 표현할 수 있다(식 (2), (3)).

$$G_p = G_i - G_r \quad (2)$$

$$G_p = G_i - 1.3597 \times 10^{-3} A \rho_B V_{Ldaf} (1-a-w) \frac{p}{p+p_L} - 0.04356 A h \phi (1-S_w) \frac{1}{B_g} \quad (3)$$

여기서 G_i : 원시부존량, MMscf
 G_r : 잔존가스량, MMscf
 A : 배유면적, acre
 h : 석탄층 두께, ft
 ρ_B : 평균 겉보기 밀도, g/cc
 V_{Ldaf} : dry ash-free Langmuir 부피 상수, scf/ton
 a : 평균 ash fraction
 w : 평균 moisture fraction
 p_L : Langmuir 압력 상수, psia
 ϕ : 공극률
 S_w : 평균 물포화율
 B_g : 가스용적인자, ft³/scf

석탄층의 원시부존량은 원시 흡착량과 자유가스량의 합이고 석탄은 가스 생산에 따라 공극률이 감소하는 압축성 암석이며 석탄층 가스가 실제가스법칙을 따른다고 가정하면, 석탄층 가스에 대한 물질평형방정식은 다음과 같이 표현된다(식 (4)).

$$G_p = 1.3597(10)^{-3} A_{\rho_B} V_{Ldaf} (1-a-w) \frac{p_i}{p_i+p_L} + 0.04356 A h \phi_i (1-S_{wi}) \frac{p_i z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} z_i T} - 1.3597(10)^{-3} A_{\rho_B} V_{Ldaf} (1-a-w) \frac{P}{P+p_L} - 0.04356 A h \phi \left(1 - \frac{S_{wi} [1+c_w(p_i-p)] + \frac{B_w (W_e - W_p)}{7758.4 A h \phi_i}}{\exp[-c_f(p_i-p)]} \right) \frac{p z_{sc} T_{sc}}{p_{sc} z T} \quad (4)$$

여기서 ϕ_i : 초기 공극률
 S_{wi} : 초기 평균 물포화율
 B_{gi} : 초기 가스용적계수, ft³/scf
 B_w : 물 용적계수, rb/stb
 B_{wi} : 초기 물 용적계수, rb/stb
 c_w : 물 압축률, psia⁻¹
 W_e : 물 유입(stb/d)
 W_p : 물 생산(stb/d)

- n : 몰 수
- R : 기체 상수, psia-ft³/lbmol-°R
- T : 저류층 온도, °R

이러한 가스 물질평형방정식을 실제로 현장에 적용하기 위하여 King[4]는 z* function을 이용하여 매장량을 예측하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 반복적인 수행이 필요하였고 그 이후 Jensen 등[5], Clarkson 등[6]등이 현장 적용성이 높은 방법들을 제안하였다. 변형된 물질평형방정식이라고 불리는 Jensen and Smith(J&S)식은 수포화 2상 유동 CBM 석탄층인 San Juan 분지의 Fruitland 석탄에 적용하기 위하여 다음과 같이 개발되었다.

$$\frac{p}{p+P_L} = \frac{-1}{1.3597V_L Ah\rho_c} * G_p + \frac{p_i}{p_i+P_L} \quad (5)$$

본 식의 유도과정에서 전제된 가정 사항은 1) volumetric 저류층(물 유입 또는 저류층 부피 변화 거의 없음), 2) 흡착된 가스만 가정(자유가스 없음), 3) 이차 공극(균열)에 물 저장 없음, 4) 석탄은 포화(saturated) 되어 있고 Langmuir 등온흡착을 따름의 4 가지이다. 본 방정식을 이용하여 가스의 p/z 값과 누적 생산량을 표현하면 다음의 Fig. 1과 같다.

본 식을 이용하여 원시부존량을 계산할 때, 실제로 가스가 다성분(multiple components)인데 단성분(single component) 가스에서 유도된 Langmuir 압력값을 사용하였거나, non-volumetric reservoir의 경우, 높은 압력층이 낮은 압력층에 비하여 감소

(depletion)가 빠른 다층 석탄층 구조인 경우, 자유가스(free gas)의 양이 상당한 경우 등에 의해 압력값이 정확하지 않은 경우에는 부존량 계산에 오류가 발생하게 된다.

Clarkson 등[7]은 균열 내 자유가스 저장의 영향을 고려하여 J&S 방정식을 확장하였다. 또한 Seidle[8]은 sorbed gas storage 효과가 고려된 가스압축인자를 도입하여 King의 방정식을 p/z*로 간단하게 변형하였다. 이 후 Clarkson 등[9]의 연구에 의하면, 균열 내 약간의 자유가스 저장, 물 유입이 없는 경우의 포화된 석탄층의 경우에는 이전 제안된 어떤 물질평형방정식을 이용하여도 매장량 계산의 오차는 1% 이내로 거의 유사함을 알 수 있었다. 포화상태, 2 상, 자유가스 저장이 낮은 현장 자료를 이용하여 분석한 결과, J&S 방정식이 가장 적절한 것으로 연구되었고 또한 이 방정식이 저류층 자료가 가장 적게 필요하며 간단한 방정식임을 알 수 있었다.

2. 감퇴곡선법을 이용한 부존량 분석

전통적인 감퇴곡선 분석은 1940년대에 발표된 Arps의 방정식에 기초하고 있다. 이 방정식은 기존의 생산이력을 이용한 함수 근사를 통하여 향후 생산량을 외삽(extrapolation)하는 경험적인 방법이다. Arp가 제안한 일반적인 감퇴곡선 방정식은 다음과 같다[10].

$$q_t = \frac{q_i}{(1+bD_i t)^{1/b}} \quad (6)$$

- 여기서 q_t : 시간 t에서의 예상 생산량, stb/d
- q_i : 초기 생산량, stb/d
- D_i : 초기 감퇴율
- b : 감퇴지수
- t : 생산기간, month 또는 year

본 방정식에서 감퇴지수는 전통(conventional) 오일, 가스 생산정에서 0에서 1사이의 값이다. 여기서 감퇴지수 b가 0일 때 지수(exponential) 함수, b가 0에서 1사이일 때 쌍곡선(hyperbolic) 함수, b가 1일 때 조화(harmonic)함수로 분류할 수 있고 과거의 생산 이력과 유추한 방정식의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해서는 가능한 장기간의 생산자료를 확보하는 것이 중요하다. 비록 식 (6)이 간단한 경험식으로 많이 사용되고 있으나 경계영향유동(boundary-dominated-flow) 환경과 생산정의 압력이 일정한 경우에만 적용할 수 있는 한계가 있다. Fetkovich[11]는 천이 유동해(transient solution)와 Arps 방정식의

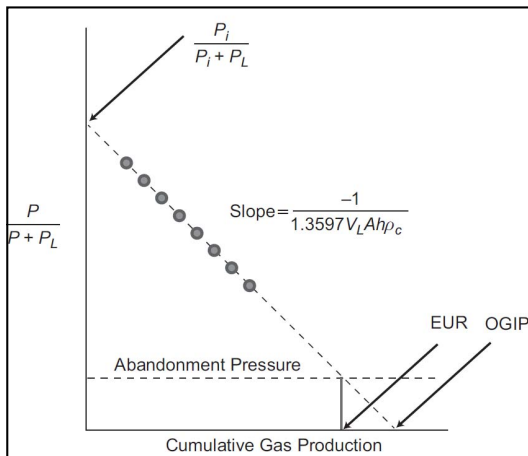


Fig. 1. Modified Material Balance plot for the determination of original gas in place [5].

경계영향유동을 결합한 방정식을 만들었다. 이 식은 모든 자료를 분석할 수 있지만, 여전히 공저압력이 일정한 경우에만 적용할 수 있는 한계가 있다[12].

일반적으로 셰일가스, CBM 등의 치밀가스 저류층은 생산 초기의 천이구간(transient period)과 생산이 안정되고 난 후의 pseudo steady-state 구간에 따라 두 가지 유동 형태가 나타나기 때문에 한 가지 유동형태로 생산량이 감퇴하는 것을 가정한 Arps 방정식을 적용할 경우 두 가지 구간의 특징을 모사하기에는 어려움이 있고 궁극가채량(estimated ultimate recovery, EUR)에 불확실성이 발생할 수 있다 [13]. Long 등[14]는 유체투과도가 낮아 두 가지 유동형태가 나타나는 저류층의 생산 감퇴곡선을 표현하기 위해서는 Arps 경험식의 두 가지 함수를 결합하여 생산 초기의 천이유동에서는 쌍곡선함수를 적용하고 특정시점 이후의 경계 영향유동에서는 지수함수를 적용한 Hyperbolic-Exponential 모델을 제시하였다. 본 모델은 간편하게 궁극가채량을 계산할 수 있는 장점이 있으나 유동 형태의 변동 시점과 지수함수구간의 감퇴율은 평가자가 결정해야 하는 문제가 있다.

정확한 변동 시점 및 지수함수구간의 감퇴율을 결정하기 위하여 Khaled[15]는 Fig. 2와 같이 쌍곡선함수 구간에 유추한 생산량의 감퇴변화율을 이용하여 지수함수 구간을 예측하는 Khaled 법을 제시하였다. 이 방법은 Hyperbolic-Exponential 모델에서 운영자 및 평가자의 경험에 의해 결정되는 요소들의 불확실성을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

변동시점(t_0)을 결정하기 위한 상수 C는 식 (7)과 같이 산출할 수 있으며 상수 C가 0에 가까울수록 지수함수 구간으로 변동되는 것을 의미하기 때문에 특정 C값을 결정해야 한다. 이때의 변동시점(t_0)은 식 (8)과 같으며 지수함수 구간의 감퇴율은 식 (9)

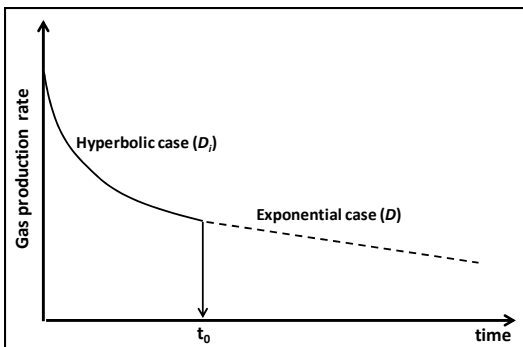


Fig. 2. Diagram of production rate profile for Khaled Model[15].

와 같이 산출할 수 있다[16].

$$C = -\frac{bD_i^2}{(1+bD_it)^2} \quad (7)$$

$$t_0 = \frac{(-bD_i^2/C)^{0.5} - 1}{bD_i} \quad (8)$$

$$D = \frac{D_i}{1+bD_it_0} \quad (9)$$

시간에 따른 CBM 생산정의 초기 생산 경향은 일반적인 가스 생산과는 큰 차이를 보인다. CBM 생산정은 초기에 지층수가 배출되는 동안 가스 생산량이 증가하다가 최고 생산량을 기록한 후 감퇴하는 경향을 보인다[17].

Fig. 3은 Alabama Warrior 분지의 Oak Grove field에 위치한 OG-134 생산정의 생산 경향으로, 지층수가 배출되면서 생산량이 증가하여 최고 생산량에 이를 때까지 초기에 11개월이 걸리고 지수함수 형태의 일정한 생산량 감퇴가 시작될 때까지 추가의 7개월이 소요되었다. 따라서, 생산이 증가하는 동안에는 감퇴분석을 하는 것이 부적절하므로 이러한 CBM 생산정의 경우에는 생산감퇴 경향이 일정해진 이후 6개월이 지나고 생산감퇴 분석을 실시하는 것이 적절하다[18].

Handy[19]는 Alabama Warrior 분지의 Deerlick Creek, Cedar Cove 그리고 Oak Grove field의 148개 CBM 생산정에 대한 생산감퇴 연구를 실시하였다. Handy는 생산 기간이 2년 이상이고 인근 석탄 광산에 영향을 받지 않은 생산정을 선정하였고, 연

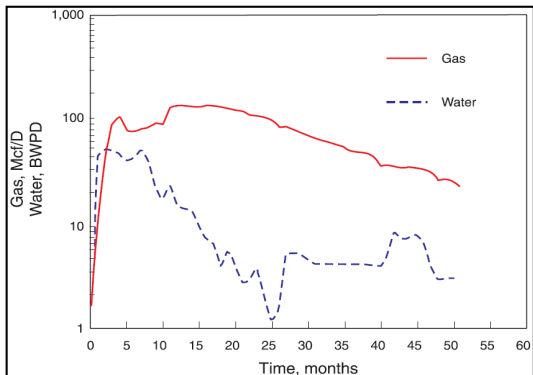


Fig. 3. Gas and water production history of CBM well (OG-134, Oak Grove field, Alabama).

구결과 CBM 생산정의 감퇴경향은 지수함수의 경향을 보임을 알 수 있었다. Fig 4는 Deerlick Creek field의 CBM 생산정의 생산이력을 이용한 생산감퇴 분석 결과로 본 광구의 CBM 생산정은 앞선 연구와 같이 지수함수 감퇴경향을 보임을 알 수 있었다.

Okuszkó[12]은 물로 포화되고, 1개층으로 이루어진 CBM의 생산감퇴 시 감퇴지수의 범위는 전통 가스 생산정과 유사하게 0 ~ 0.5인 것을 확인하였다. 여기서 감퇴지수는 저류층압력과 공저압력 차이에 의해서 영향을 크게 받았고 이 차이가 작은 경우에는 b 값이 0에 근접함을 알 수 있었다. 그러나 실제 CBM 생산정은 생산량이 낮기 때문에 전통 가스 생산정에 비하여 난류(turbulence)의 영향이 상대적으로 작을 뿐 아니라 가능한 압력차를 최대한 하여 생산을 진행함으로써 b 값의 범위를 0.4 ~

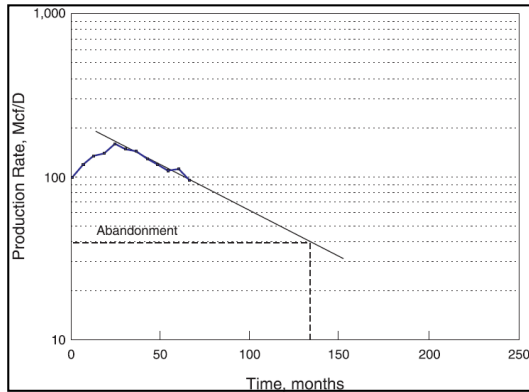


Fig. 4. Exponential decline trend of Deerlick Creek CBM well (Alabama).

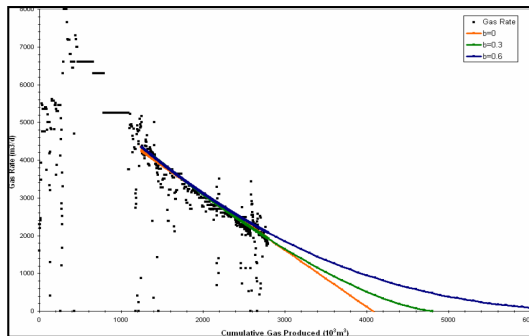


Fig. 5. CBM production example from Horseshoe Canyon with different decline exponent b.

0.5 사이로 적용하는 것이 적절한 것으로 연구되었다. 또한, CBM의 가스흡착효과에 의하여 상당량의 가스가 저류층의 압력이 감소함에 따라 탈착하게 되고 이는 생산 후반부의 생산량을 안정화시켜 감퇴지수를 상승시키는 요인이 된다고 보고하였다.

상기의 이론적인 연구결과를 종합하면 CBM 생산정의 생산 후반부 경향은 쌍곡선함수 감퇴의 경향을 보인다. 그러나, 상당히 오랜 기간이 지나기 전에는 쌍곡선함수 경향은 지수함수 경향과 구분하기가 어렵다. Fig. 5는 Horseshoe Canyon CBM 생산정 중 상대적으로 생산압력이 일정한 생산정의 이력으로 감퇴지수의 범위는 0 ~ 0.6 사이를 보이고 있고, 여기서 쌍곡선감퇴 경향을 구분하기 위해서는 추가로 몇 년의 시간이 더 필요함을 알 수 있다. 하지만, 실제로 CBM 생산정이 쌍곡선 감퇴 경향을 가지고 있다면 지수함수 감퇴를 적용하는 것은 궁극가채매장량을 심각하게 과소평가하게 되는 결과를 초래할 수 있다[12].

3. 현장 CBM 생산정 자료를 이용한 부존량 분석 물질평형법 적용

Horseshoe Canyon CBM 생산정에 대하여 전통 가스 물질평형방정식과 J&S 방정식을 각각 적용하여 원시부존량을 산출하였다. 부존량 산출을 위하여 370 ~ 510m 구간에서 생산 이후 압력시험이 실시된 4개의 생산정을 선정하였고, 압력시험 결과와 물질평형법 계산을 위한 변수들은 다음의 Table 1과 같이 적용하였다. 여기서, CBM 층의 초기압력은 4개 생산정의 시간에 따른 압력자료를 다음의 Fig. 6과 같이 선형회귀 분석을 이용하여 결정하였고 이를 100/15-18-025-20W4/00의 초기압력 측정자료인 290.1psia와 비교한 결과 측정값이 적절함을 확인할 수 있었다. Langmuir 압력은 Clarkson[6]이 Horseshoe Canyon CBM에서 취득한 값을 적용하였고 가스압축인자는 각 생산정의 가스성분분석

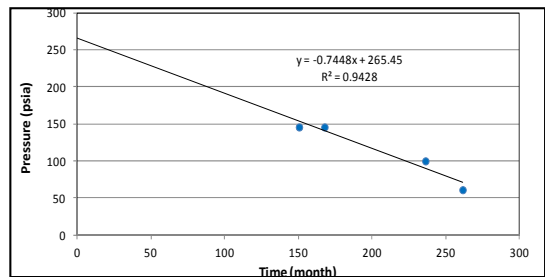


Fig. 6. Initial pressure estimation using linear regression of pressure vs. time data.

Table 1. Pressure test results and variables for Material Balance calculation

Input Parameter	100/15-18-025-20W4/00	100/08-18-025-20W4/00	100/05-01-019-15W4/00	100/04-09-019-15W4/00
On production date	2001-12-01	2002-10-01	2004-10-01	2004-02-01
Pressure Test				
- Test date	2010-07-09	2010-07-10	2009-09-15	2009-08-10
- Run Depth, (m/ft)	508.5/1,668.31	500.5/1,642.06	375.5/1,231.96	401.0/1,315.62
- Run Depth Temp. (oF)	62.6	62.6	62.6	64.4
- Shut in HR (hour)	387.4	385.3	436	457
- Pressure (psia)	61.2	100.1	145.9	145.9
Initial pressure (psia)	265.45	265.45	265.45	265.45
Langmuir pressure (psia)	1,390	1,390	1,390	1,390
Z factor	0.960	0.960	0.960	0.957

Table 2. OGIP calculation using each Material Balance method

Cum. Prod & Original Gas in Place (OGIP)	100/15-18-025-20W4/00	100/08-18-025-20W4/00	100/05-01-019-15W4/00	100/04-09-019-15W4/00
Cumulative Production (by Nov, 2014, MMcf)	199.86	59.42	271.57	150.06
OGIP (Conventional, MMcf)	219.57	65.39	354.36	193.36
OGIP (J & S, MMcf)	229.00	69.70	400.75	200.38
Difference (%)	4.12	6.18	11.58	3.50

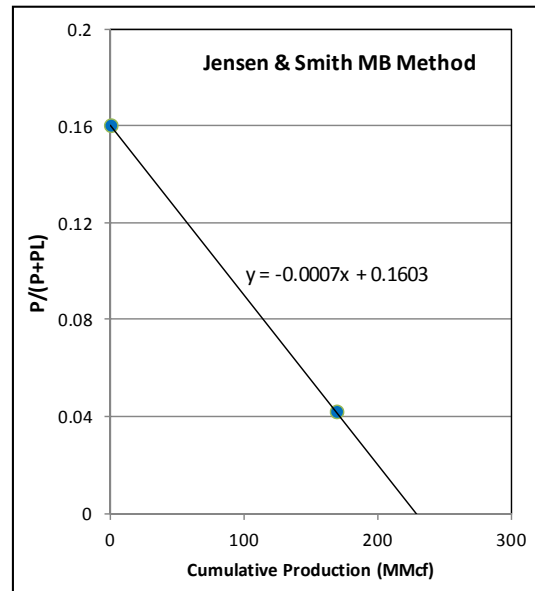
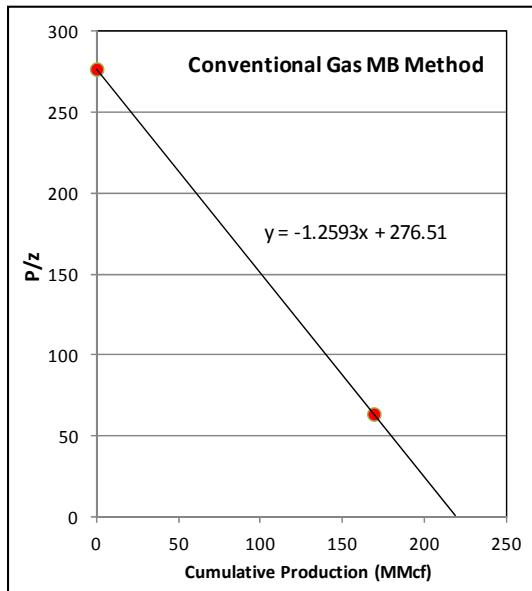


Fig. 7. Material balance OGIP estimation (100/15-18-025-20W4/00).

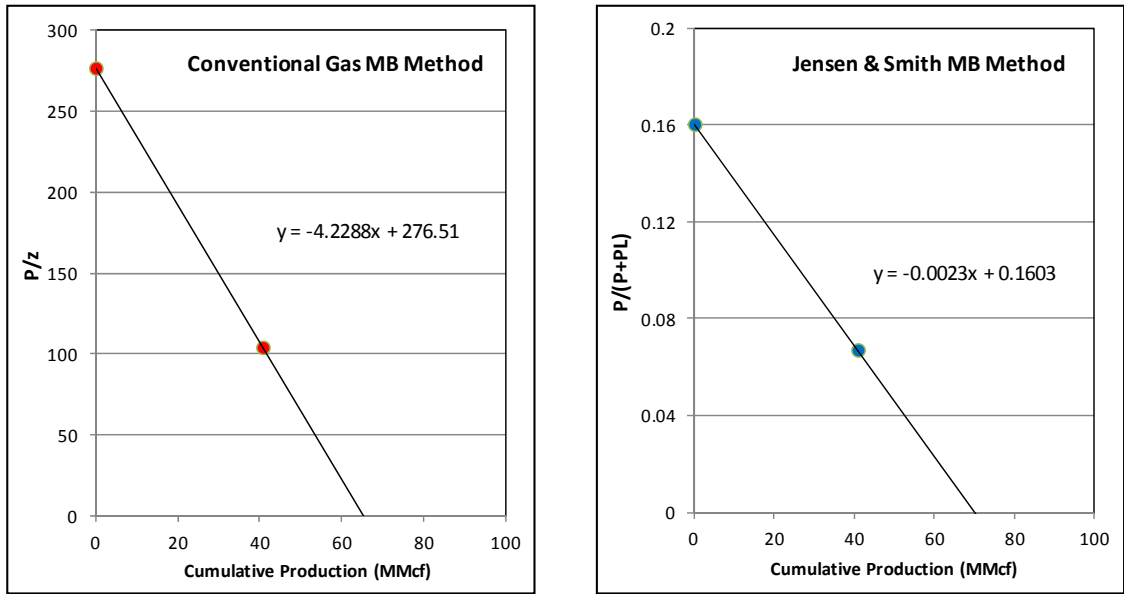


Fig. 8. Material balance OGIP estimation (100/08-18-025-20W4/00).

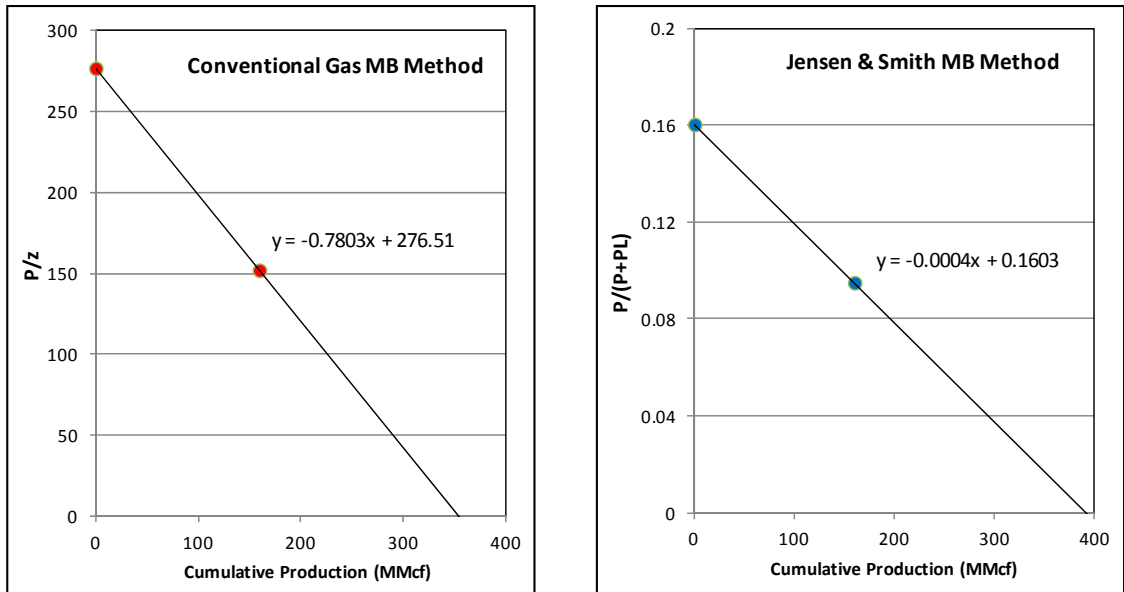


Fig. 9. Material balance OGIP estimation (100/05-01-019-15W4/00).

결과를 통하여 산정하였다.

2014년 11월까지 CBM 생산정의 누적 생산량, 그리고 전통가스 물질평형방정식과 J&S 방정식을 이용한 부존량 계산 결과는 다음의 Table 2와 같고 각

각의 방법을 이용하여 분석한 결과를 그래프로 도시하면 Fig. 7 ~ 10과 같다. 분석결과, 전통가스 물질평형방정식을 이용한 경우와 J&S 물질평형방정식을 이용한 경우는 100/05-01-019-15W4 생산정에

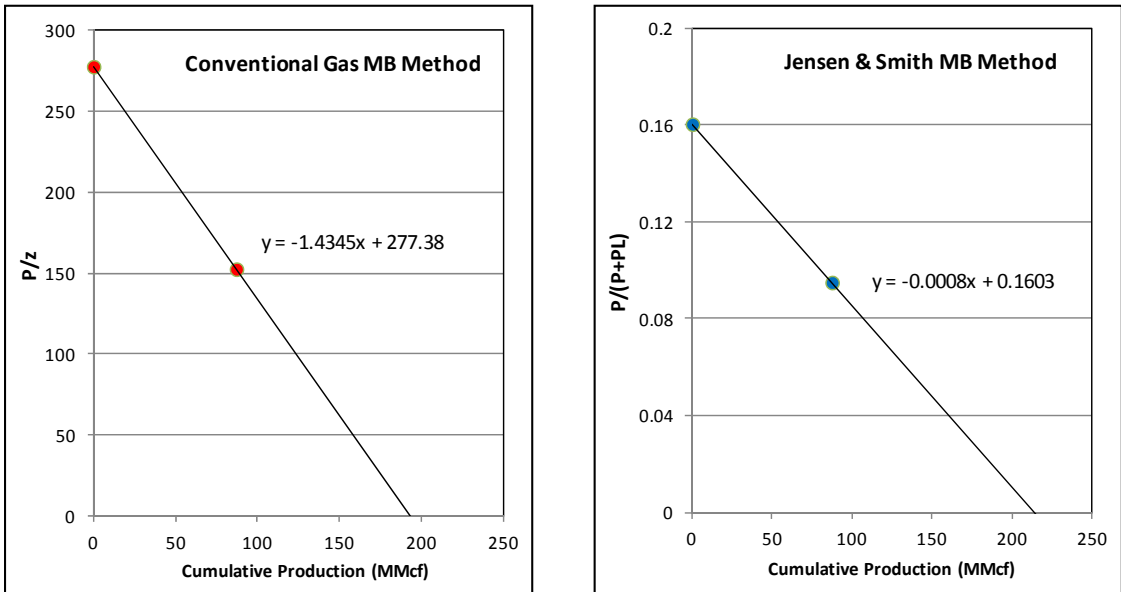


Fig. 10. Material balance OGIP estimation (100/04-09-019-15W4/00).

서 11.58%이고 나머지 3개의 생산정에서 3 ~ 6% 범위로 부존량 예측에 큰 차이는 없고, J&S 방정식을 이용할 경우 부존량이 더 크게 계산되었다.

감퇴곡선법 적용

위에서 언급한 감퇴곡선법 중 Arps 경험식과 Khaled 법을 이용하여 Horseshoe Canyon CBM 생산정의 생산성과 부존량을 예측하였다. 분석에 사용된 생산정은 물질평형법 분석에서 적용한 4개와 동일하

다. Fig. 11 ~ Fig. 14는 4개 생산정의 생산 이력과 Arps 경험식 및 Khaled 법을 통해 유추한 생산 곡선이다. Arps 경험식을 적용하기 위하여 함수의 평가 인자인 초기 생산량(q_i), 감퇴율(D_i)와 감퇴지수(b)는 비선형 회귀분석(non-linear regression)을 이용하여 결정하였다. Khaled 법을 적용하기 위하여 Arps 경험식의 감퇴지수 및 감퇴율을 통해 지수함수로 변동되는 변동 시점(t_0)과 지수함수의 감퇴율을 산출하였다. Khaled 법의 유동형태 변동시점은

Table 3. Analysis results using Arps hyperbolic empirical equation and Khaled Model

Well name		100/15-18-025-20W4/00	100/08-18-025-20W4/00	100/05-01-019-15W4/00	100/04-09-019-15W4/00
Prod. period (month)		156	146	122	130
Initial rate (q_0 , Mcf/d)		1,832.93	241.75	122.17	69.29
Arps empirical equation	Decline rate (hyperbolic, %/month)	2.50	89.76	0.03	0.03
	Decline exponent (b)	1.141	3.221	3.037	2.824
Khaled Model	t_0 (month)	94	56	46	48
	Decline rate (exponential, %/month)	0.0093	0.0055	0.0057	0.0059

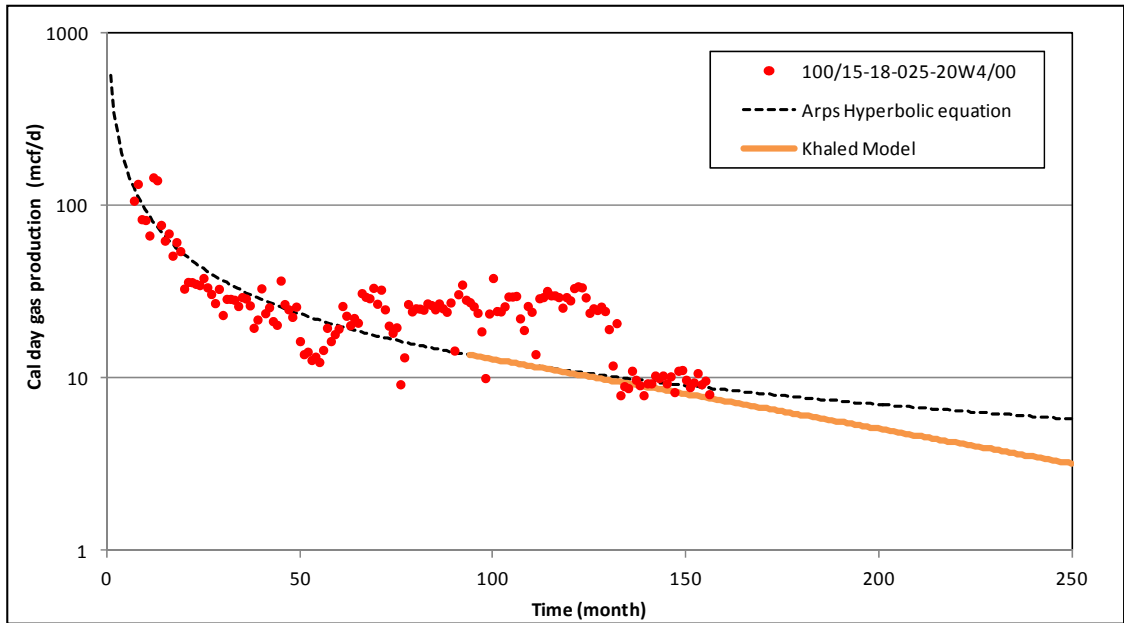


Fig. 11. Production history and estimated production (100/15-18-025-20W4/00).

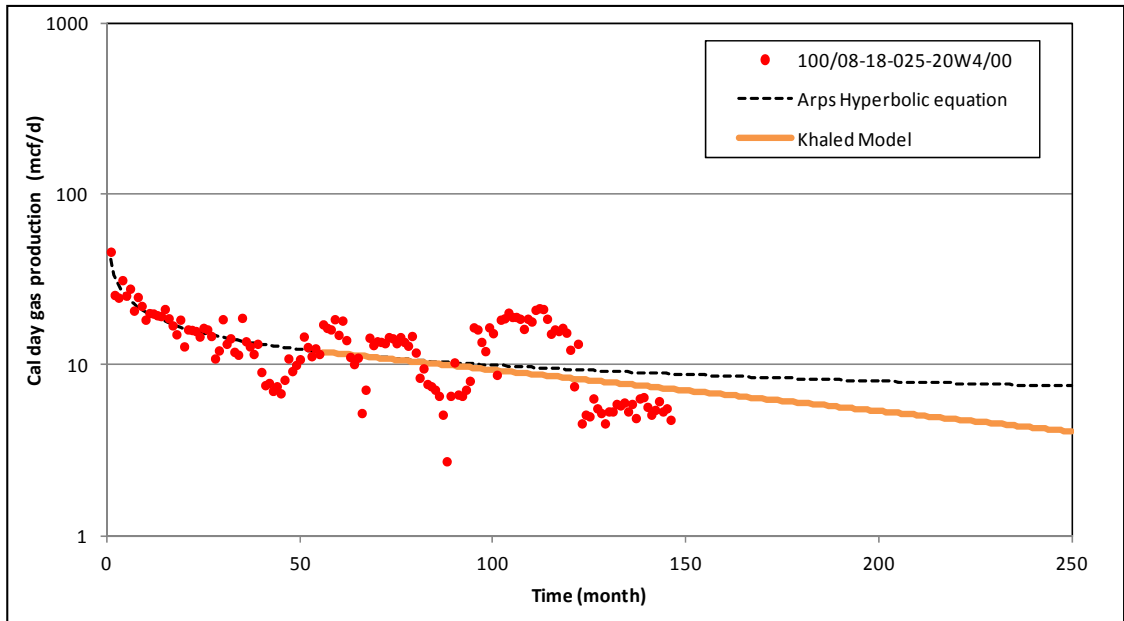


Fig. 12. Production history and estimated production (100/08-18-025-20W4/00).

식 (7)을 이용한 C값의 계산을 통해 결정하였다. 여기서 C값이 0에 가까워질수록 쌍곡선 구간에서 지

수구간에 가까워짐을 의미하고 본 연구에서는 C값이 -0.0001일 때를 변동시점으로 결정하였다[16].

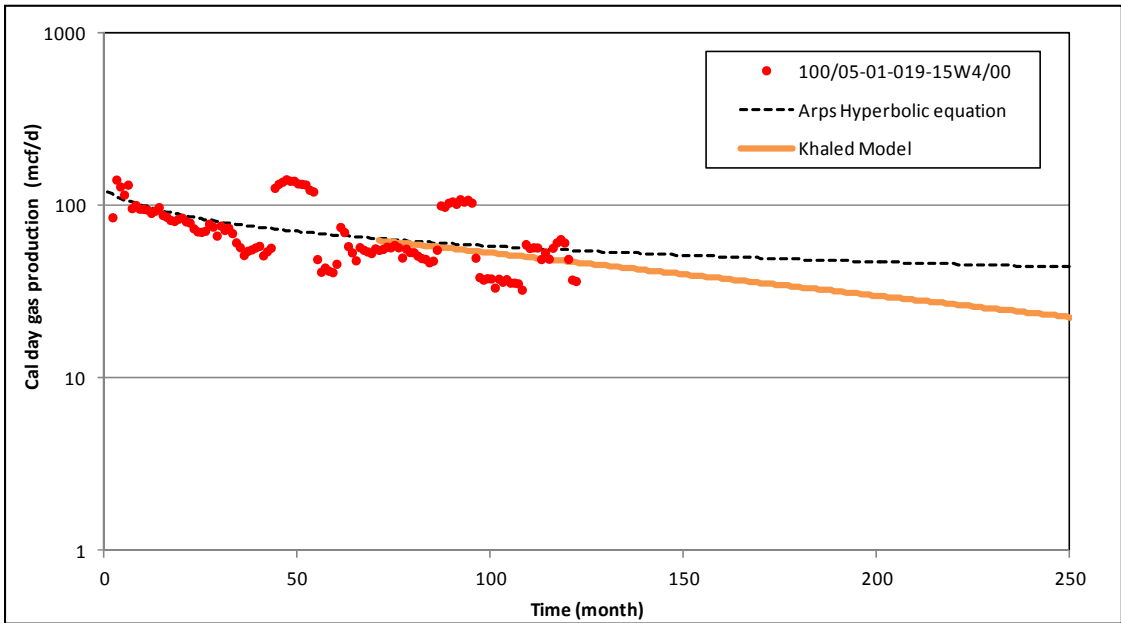


Fig. 13. Production history and estimated production (100/05-01-019-15W4/00).

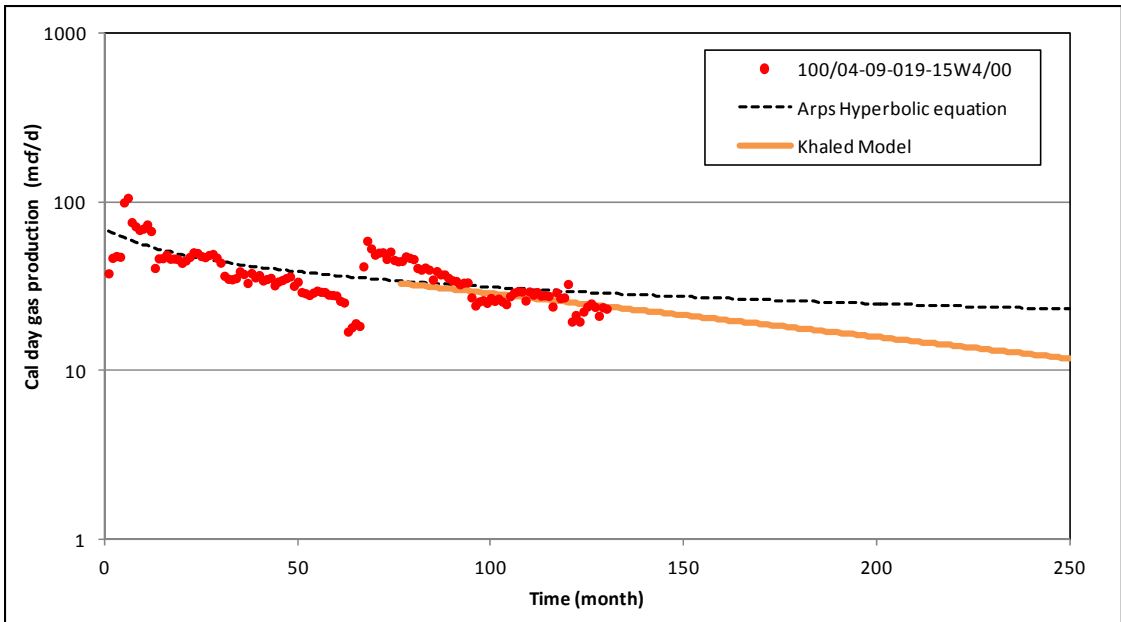


Fig. 14. Production history and estimated production (100/04-09-019-15W4/00).

Arps 경험식 및 Khaled 법을 이용한 감퇴 분석 결과는 Table 3과 같다.

일반적으로 CBM 생산정은 시추 심도가 상대적으로 얕아서 생산정의 압력이 높지 않으므로 생산

Table 4. OGIP estimation using Arps equation and Khaled Model

Cum. Prod & Initial Gas in Place (OGIP)	100/15-18-025-20W4/00	100/08-18-025-20W4/00	100/05-01-019-15W4/00	100/04-09-019-15W4/00
Cumulative Production (by Nov, 2014, MMcf)	199.86	59.42	271.57	150.06
OGIP (Arps hyperbolic, MMcf)	∞	∞	∞	∞
OGIP (Khaled Model, MMcf)	202.06	94.82	508.71	271.35

Table 5. OGIP calculation using each Material Balance & DCA method

Cum. Prod & Initial Gas in Place (OGIP)	100/15-18-025-20W4/00	100/08-18-025-20W4/00	100/05-01-019-15W4/00	100/04-09-019-15W4/00
Cumulative Production (by Nov, 2014, MMcf)	199.86	59.42	271.57	150.06
OGIP (Conventional MB, MMcf)	219.57	65.39	354.36	193.36
OGIP (J & S MB, MMcf)	229.00	69.70	400.75	200.38
OGIP (Khaled Model, MMcf)	202.06	94.82	508.71	271.35
Difference (%) (Conven. MB vs. Khaled Model)	-8.67	31.04	30.34	28.74
Difference (%) (J&S MB vs. Khaled Model)	-13.33	26.49	21.22	26.15

초기에는 일정한 생산 경향을 보이지만, 생산이 일정기간 진행된 이후에는 생산정 내에서 액상 집적 (liquid loading) 문제가 발생하여 생산 경향이 Fig. 11 ~ Fig. 14의 50 months 이후의 생산 경향과 같이 생산량이 감소, 증가를 반복하는 매우 불규칙한 경향을 보이게 된다. 또한, 생산초기에는 Arps 쌍곡선 경험식과 적합도가 높으나 생산말기에는 불규칙적이기는 하지만 평균적인 생산 경향이 지수함수 형태로 감소하는 것을 알 수 있다.

Table 4는 Arps 쌍곡선 경험식과 Khaled 법을 이용하여 각 CBM 생산정의 원시부존량을 예측한 결과이다. 예측결과, 생산이 지속될수록 시간에 따른 생산량 감퇴가 거의 발생하지 않아 감퇴지수가 1이상, 최대 3.5에 이르게 되므로 Arps 쌍곡선 방정식을 이용하여 원시부존량을 계산할 경우, 그 값이 발산하여 계산이 불가능하게 된다. 따라서, CBM 생산정에 생산감퇴곡선분석법을 적용하기 위해서는 생산량이 지수함수의 감퇴경향을 보이는 구간

이후에 지수함수를 사용하는 Khaled 법을 적용함이 현실적이라는 것을 알 수 있다. 실제로 CBM 생산정의 생산 경향은 생산량과 압력이 감소하면서 액상 집적이 발생하여 생산량이 불규칙한 경향을 보이므로 이를 평균하여 보면, 부존량이 무한대로 발산하기 보다는 일정한 경향으로 감소하게 된다.

물질평형법 및 감퇴곡선법 결과 분석

물질평형법과 감퇴곡선법을 이용하여 CBM 생산정의 원시부존량을 예측하였고 그 결과를 정리하면 Table 5와 같다. 전통가스 물질평형방정식을 이용한 부존량 예측 결과와 Khaled 법을 이용한 예측 결과의 차이는 8.67% ~ 31.04% 였고, J&S 방정식과 Khaled 법을 이용한 부존량 예측 결과의 차이는 13.67% ~ 26.49%로 후자의 경우가 차이가 더 작았다. 하지만, 물질평형법과 감퇴곡선법의 차이가 가장 큰 100/08-18-025-20W4/00에서 물질평형법에 의한 결과값을 전통가스 방정식을 적용한 경우와

J&S 방정식을 적용한 경우를 각각 Khaled 법과 비교한 결과, 차이가 4.55%로 크지 않아 CBM 생산정에서 J&S 방정식 계산을 위한 Langmuir 등온흡착곡선을 구하기 어려운 경우에는 전통가스 물질평형 방정식을 적용하여도 부존량 예측 결과에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 5의 4개 연구 대상 CBM 생산정들은 공통적으로 감퇴곡선법(Khaled Model)에 의한 원시부존량 값이 물질평형법에 의한 결과와 비교 시 더 크게 평가되었는데, 이는 4개의 생산정이 Horseshoe Canyon 저류층 뿐만아니라 그 하부 구간의 저류층인 Upper Cretaceous기의 Belly River층, Second White Speck층 등에서도 추가로 생산이 진행되고 있는 다층(multi-layer) CBM 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 저류층 압력, 온도, Langmuir 압력 등을 Horseshoe Canyon CBM층 내 특정 단일 구간의 코어 흡착 분석자료를 통해 산출하였고 1개 생산정 외 나머지 3개의 생산정에 대한 초기 저류층 압력 측정값을 구할 수 없어 시간-압력 값의 선형 회귀분석을 통해 추정함에 따른 오차도 제한적으로 영향을 미친 것으로 판단된다.

따라서 다층 CBM의 부존량을 정확하게 평가하기 위해서는 각 생산층에 대한 Khaled 법의 생산 후기 지수 감퇴 곡선 특성을 충실히 반영할 수 있는 각 저류층 구간별 압력자료, 코어자료 그리고 흡착분석 등의 시험자료를 취득하여야 한다. 또한, 다층 CBM 특성으로 인한 일부 현장 자료의 적용한계에도 불구하고, 생산 기간이 40년에 이르는 생산말기 CBM 생산정의 실제 감퇴곡선을 Khaled 법의 생산 후반 지수감퇴 특성 구간의 유사성(analogy)을 근거로 비교 유추하면, 캐나다 서부 분지 Horseshoe Canyon CBM은 다른 전통 유, 가스정과 비교하여 생산 후반으로 갈수록 쌍곡선 감퇴 경향이 강하게 나타나는 특성을 보여주고 있다.

이러한 특성을 고려할 때, Horseshoe Canyon CBM의 매장량 평가 시, 생산 이력이 길지 않은 CBM 생산정들은 인접 지역 내 완결, 암석 샘플 분석 등과 생산량에 영향을 미칠 수 있는 지상설비 등의 관련 자료를 고려하여 유사 생산정을 선정하여야 하고 이를 바탕으로 지수함수 구간으로의 전환시점을 결정하여야 한다. 그리고, 매장량을 이용한 자산 가치 평가 관점에서 보면, 생산량은 낮지만 장기간의 생산 특성으로 인하여 생산종료 시점에 따른 매장량의 변동이 크므로 일반적인 유, 가스정의 매장량 예측과는 다른 특성을 보여준다.

III. 결 론

Horseshoe Canyon CBM 광구 4개 생산정의 생산이력과 압력 시험자료를 바탕으로 물질평형법과 감퇴곡선법을 이용하여 원시부존량을 예측하였다. 물질평형법은 일반 가스 물질평형법과 J&S법을 이용하였고, 감퇴곡선법은 Arps 경험식과 Khaled 법을 이용하였다.

연구결과, 일반 가스 물질평형법과 J&S법을 이용한 경우의 차이는 12% 이내로 부존량 예측에 큰 차이는 없고, J&S식을 이용할 경우 부존량이 더 크게 예측되었다. 감퇴곡선법을 적용한 경우, 생산이 지속되어도 생산량 감퇴가 거의 발생하지 않아 감퇴지수가 1이상, 최대3.5에 이르러, Arps 방정식을 이용한 경우 부존량 예측 값은 발산하였다. 따라서, 대상 광구의 CBM 생산정은 일정 기간 후 생산감퇴가 지수 경향으로 변하는 Khaled 법을 적용하는 것이 적절하였다.

일반 가스 물질평형방정식을 이용한 부존량 예측 결과와 Khaled 법을 이용한 예측 결과의 차이는 8.67% ~ 31.04% 였고, J&S 방정식과 Khaled 법을 이용한 부존량 예측 결과의 차이는 13.67% ~ 26.49%로 후자의 경우가 차이가 더 적었다. 여기서, 물질평형법과 감퇴곡선법에 의한 결과 값 차이는 Horseshoe Canyon층의 다층 저류층 특성, 특정 단일 구간의 압력, 온도 사용 그리고 초기 저류층 값 계산의 오차에 기인한 것으로 판단된다.

마지막으로 상기의 연구를 종합해보면, Horseshoe Canyon CBM은 생산 전 부피법에 의하여 개략 매장량을 예측하고 생산이 진행되고 압력 시험이 실시된 후, 전통가스 물질평형방정식이나 J&S 방정식을 적용한 물질평형법과 Khaled 법을 이용한 감퇴곡선법을 적용하는 것이 적절하였다. 이 때 현장의 다층완결에 의한 복수 구간 생산 고려와 신뢰도 높은 흡착분석 시험 수행 등의 저류층 환경을 적절하게 평가할 수 있는 자료를 취득하는 것이 물질평형법을 통한 부존량 평가의 정확도를 향상시킬 수 있는 주요한 요소이다. 그리고, 이러한 결과를 비교 분석하여 부존량 값이 적절한지 검증한 후, 최종 CBM 부존량을 예측하는 것이 적절함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “석탄층메탄가스(CBM) 생산기술 최적화 및 현장실증 연구” 과제입니다.

(과제번호 20152510101880)

REFERENCES

- [1] Smith, G., "Coal Resources of Canada", Geological Survey of Canada, 18-20, (1989)
- [2] Gatens, M., "Coal bed Methane Development: Practices and Progress in Canada," Journal of Canadian Petroleum Technology, 44(8), 1-2, (2005)
- [3] Sung, W. M., 2009, "석유 가스 공학- 저류공학 기초", 구미서관, 184, (2009)
- [4] King, G. R., "Material Balance Techniques for Coal Seam and Devonian Shale Gas Reservoirs, SPE 65th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, SPE 20730, (1990)
- [5] Jensen, D., and Smith, L. K., "A Practical Approach to Coal bed Methane Reservoir Prediction Using a Modified Material Balance Technique", Proceeding of the International Coal bed Methane Symposium, Tuscaloosa, Alabama, 105-113, (1997)
- [6] Clarkson, C. R., Behmanesh, H., and Chorney, L., "Production Data and Pressure Transient Analysis of Horseshoe Canyon CBM wells, Part II : Accounting for Dynamic Skin", Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, CSUG/SPE 148994, (2011)
- [7] Clarkson, C. R., and Bustin, R. M., "Coal bed Methane: Current Field Based Evaluation Methods", SPE 131791-PA, (2011)
- [8] Seidle J. P., "A Modified p/Z Method for Coal Wells", SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Gillette, Wyoming, SPE 55605, (1999)
- [9] Clarkson, C. R., and McGovern, J. M., "Study of the Potential Impact of Matrix Free Gas Storage Upon Coalbed Reserves and Production Using a New Material Balance Equation," Paper 0113, Proceeding of the 2001 International Coalbed Methane Symposium, The University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama, 133-149, (2001)
- [10] Arps, J. J., "Analysis of Decline Curves", A.I.M.E, 228-247, (1945)
- [11] Fetkovich, M. J., "Decline Curve Analysis Using Type curves", Journal of Petroleum Technology, SPE 4629, 1065-1077, (1980)
- [12] Okuszko, K. E., Gault B.W., and Mattar L., "Production Decline Performance of CBM Wells", Petroleum Society's 8th Canadian International Petroleum Conference, 16, (2007)
- [13] Kupchenko, C. L., Gault, B. W. and Mattar, L., "Tight Gas Production Performance Using Decline Curves," CIPC/SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, SPE 114991, (2008)
- [14] Long, D. R. and Davis, M. J., "A New Approach to the Hyperbolic Curve," Journal of Petroleum Technology, 40(7), 909-912, (1988)
- [15] Khaled, A. F., "Predicting Production Performance using a Simplified Model," World Oil, 227(4), 147-151, (2006)
- [16] Yang, S. L., Lim, J. S., "생산 감퇴곡선분석법을 이용한 캐나다Horn River 분지의 셰일가스 생산량 예측 및 표준곡선 추정", 한국자원공학 회지, Vol. 50, No. 4, pp. 502-511, (2013)
- [17] Halliburton, "Coal bed Methane: Principles and Practices - Chapter 4. Reservoir Analysis", 191-281, (2007)
- [18] Richardson, J. S., Sparks, D. P., and Burkett, W. C., "A Comprehensive Evaluation to Predict Ultimate Recovery of CBM," Proc., CBM Symposium, Tuscaloosa, Alabama, 293-306, (1991)
- [19] Handy, K. P., "The Use of Production Profiles for CBM Valuations," Proceeding, CBM Symposium, Tuscaloosa, Alabama, 443-452, (1991)