



## 석탄층 메탄가스전에서 압력 의존 투과도를 고려한 생산거동 예측 모델 개발

김상호 · †권순일

동아대학교 에너지자원공학과

(2019년 3월 5일 접수, 2019년 5월 29일 수정, 2019년 5월 30일 채택)

## Development of Production Performance Forecasting Model Considering Pressure Dependent Permeability at Coalbed Methane Reservoir

Sangho Kim · †Sunil Kwon

Dept. of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University,  
Busan, 550-37, Korea

(Received March 5, 2019; Revised May 29, 2019; Accepted May 30, 2019)

### 요 약

본 연구에서는 석탄층 메탄가스전에서 영향반경 내 저류층 압력에 따라 변화하는 투과도를 고려한 저류층 생산성을 산출하고 그 저류층의 생산특성을 반영한 물질평형법을 사용하여 향후 생산거동을 예측하는 모델을 개발하였다.

석탄층 메탄가스전을 대상으로 개발한 방법과 전통적인 방법의 저류층 생산성을 유정시험 측정치를 기준으로 비교하였다. 그 결과, 전자의 경우 결정계수( $R^2$ )가 약 0.76, 후자의 경우 0.69이었다. 이를 통해 석탄층 메탄가스전의 생산성을 대표할 때, 영향반경 내 저류층 압력과 압력 의존 투과도를 고려한 저류층 생산성이 더 적합함을 확인하였다. 이 과정을 통해 유정시험 측정치가 존재할 때, 압력 의존 투과도를 계산하기 위한 영향반경 내 저류층 압력을 산정하는 방법을 제안하였다.

산출한 저류층 생산성과 물질평형법을 이용하여 31개 가스정의 향후 15년간의 생산거동을 예측하여 압력 의존 투과도를 고려하지 않은 문헌의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 적용된 현장의 압력 의존 투과도는 최대 1.17배 상승하여 각 가스정당 일일 생산량이 문헌의 결과 대비, 최대 약 15% 증가하는 결과가 도출되었다. 문헌들에 따르면, 석탄층 메탄가스전의 투과도는 저류층 압력에 따라 6 ~ 25배 증가하기도 한다. 그 경우, 생산거동은 전통적인 가스전과 큰 차이가 나타날 것으로 사료된다.

**Abstract** - In this study, a model was developed for estimating deliverability considering the pressure dependent permeability and predicting production profile with Material Balance Equation(MBE) for Coalbed Methane(CBM) fields.

The estimated deliverability was compared with the conventional deliverability based on CBM well testing data with coefficient of determination( $R^2$ ). As a result, the former was 0.76 and the latter was 0.69. It was confirmed that the deliverability which consider the pressure dependent permeability is more adoptable when representing the productivity of CBM fields. Through this process, in order to calculate pressure dependent permeability when well testing data exist, a method to infer reservoir pressure within the radius of investigation was proposed.

The production profile of 31 gas wells was predicted for 15 years, using the estimated deliverability and the MBE. After that, the results was compared with simulation results of the literature.

†Corresponding author:sikwon@dau.ac.kr

The simulation results did not account the pressure dependent permeability and the developed model results considered that. As the applied field permeability rised 1.17 times, field production rate was increased approximately 15% than the literature results. According to other researches, the permeability of CBM fields can be rise 6 ~ 25 times. For these cases, the production profiles may have significant difference with conventional gas fields.

**Key words** : coalbed methane(CBM), pressure dependent permeability, P&M(Palmer and Mansoori) model, S&D(Shi and Durucan) model, well deliverability, flowing material balance(FMB)

### I. 서론

비전통가스자원인 석탄층 메탄가스(CBM, Coalbed Methane)는 석탄에 흡착된 형태로 존재하는 가스로, 메탄을 95% 이상 함유하고 있다[1]. 석탄층 메탄가스 저류층은 크게 3가지 요소로 구성된다. 석탄입자(coal matrix), 자연균열인 주탄리(face cleat) 그리고 부탄리(butt cleat)이다(Fig. 1.1).

석탄층 메탄가스전의 생산거동(production profile)은 전통가스전의 그것과 상이하다(Fig. 1.2). 석탄층 메탄가스의 생산거동은 크게 3가지 단계로 나

누어진다. 첫째, 물을 생산하는 단계이다. 가스가 생산되는 시점의 압력인 탈착압력(desorption pressure)까지 양수과정(de-watering)을 통해 저류층 압력을 강하시킨다. 둘째, 일일 가스생산량이 최고점에 다다르게 되는 단계이다. 저류층은 유사정상상태(pseudo steady state)에 도달하고, 탈착되어 생산되는 가스량이 증가하면서 최고점에 도달하여 물의 일일 생산량은 거의 없거나 무시된다. 셋째, 가스만 생산되는 단계이다. 이 마지막 단계의 생산거동을 예측하는 것은 매우 중요한데, 물이 생산되는 기간은 수개월에서 최대 2년 정도 차지하는 반면에,

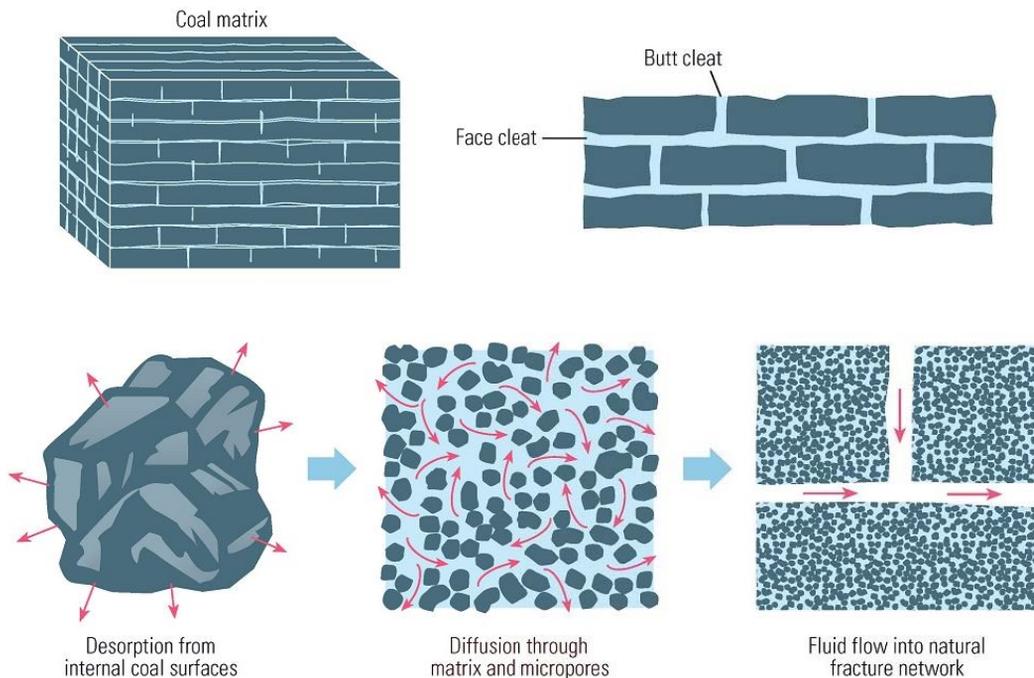


Fig. 1.1. Coal matrix system and desorption process [3].

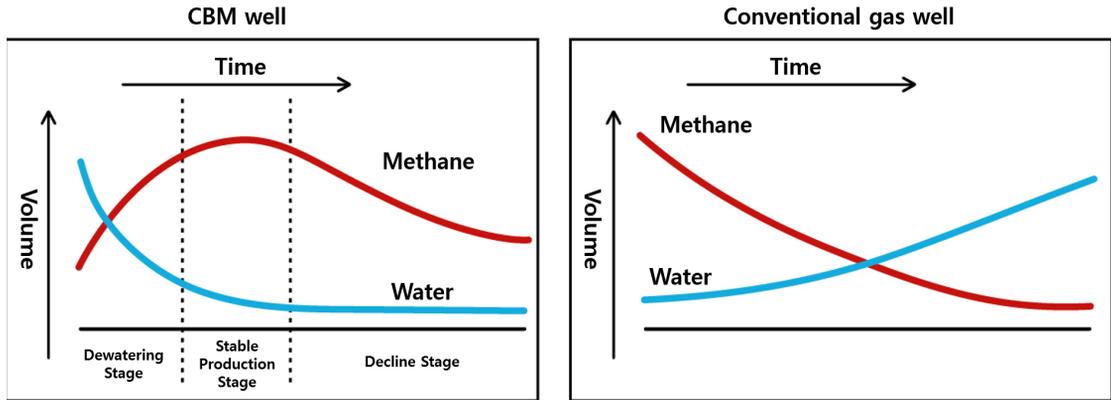


Fig. 1.2. Generalized production profiles for CBM and conventional gas well [4].

가스만 생산되는 마지막 단계는 10년에서 20년 동안 지속되어 석탄층 메탄가스전의 경제적인 수명 대부분을 차지하기 때문이다[2].

전통가스전에서 생산거동을 예측하는 방법 중 하나로 저류층 생산성(well deliverability)과 유동물질평형법(FMB, Flowing Material Balance)을 활용하는 것이 있다. 즉, 산출된 저류층 생산성을 이용하여 압력강하에 따른 일일 생산량을 계산하고 일정 기간 동안 누적되는 생산량과 물질평형식을 이용, 생산이 진행됨에 따라 감소하는 저류층 압력을 산정하여 갱신한다. 그 후, 갱신된 저류층 압력 상황에서 저류층 생산성을 재산출, 일일 생산량을 예측하는 과정을 반복하여 시간에 따른 일일 생산량인 생산거동을 예측하게 된다.

석탄층 메탄가스전은 흡착된 상태로 가스를 저장하고 탄리의 압축도가 전통가스전의 공극 압축도보다 매우 크다. 이러한 이유로, 생산이 진행되면서 감소하는 저류층 압력에 따라 유체유동통로인 탄리의 너비는 증가하거나 감소하여 석탄층의 투과도는 변화하게 된다. 이를 압력 의존 투과도(pressure dependent permeability)라 한다.

Palmer와 Mansoori[5] 그리고 Shi와 Durucan [6,7]은 석탄층의 저류층 압력에 따른 탄리공극률 및 유효수평응력을 통해 압력 의존 투과도를 묘사한 P&M 모델과 S&D 모델을 제안하였다.

Seidle[2]은 미국 Warrior 분지의 Deerlick Creek의 석탄층 메탄가스전의 생산성을 전통적인 방법으로 산출했다. 또한 동일한 분지의 Brookwood 현장에서의 생산거동을 예측하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 하지만 석탄층 메탄가스의 주요 특성인 압력 의존 투과도를 고려하지 않았다.

Thungsuntonkhun와 Engler[8]는 Warrior 분지

의 Deerlick Creek 현장과 San Juan 분지의 Cedar Hill Fruitland에서 압력 의존 투과도가 고려된 저류층 생산성을 산출하여 유정시험 자료와 비교하였다. 하지만 압력 의존 투과도를 계산할 시, 저류층 압력이 아닌 공저압력을 사용하여 계산하였다. 유정시험은 그 과정이 진행됨에 따라 영향반경이 점점 넓어지기 때문에 영향반경 내 저류층 압력을 고려하여 압력 의존 투과도를 계산해야 한다.

Feng 등[9]은 중국 Qinshui 분지에 위치한 석탄층 메탄가스전의 저류층 생산성을 S&D 모델을 사용하여 도출한 후, 단일 가스전에서 취득한 생산자료와 비교하였다. 해당 현장은 가스만 생산되는 단계이므로 저류층은 유사정상상태에 도달하여 생산이 진행되면서 저류층 압력은 강하하지만, 생산이 진행됨에 따라 강하하는 저류층 압력을 고려하지 않고 도출된 저류층 생산성을 검증하였다.

이에 본 연구에서는 물이 생산되지 않는 마지막 단계의 석탄층 메탄가스 혹은 생산 시작단계부터 물이 생산되지 않는 건성 석탄층 메탄가스(Dry CBM)를 대상으로, 영향반경 내 저류층 압력을 산정하고 이와 함께 압력 의존 투과도 모델을 사용하여 석탄층의 투과도 변화를 계산하였다. 그리고 이를 고려한 저류층 생산성을 산출하여 생산거동예측에 적용하는 모델을 개발하였다.

## II. CBM 생산성 예측 이론

### 2.1. 저류층 생산성

저류층 생산성은 주어진 평균 저류층 압력과 특정 공저 압력에서 저류층으로부터 얻을 수 있는 오일/가스 생산량으로 정의되며 유정 생산성에 영향을 미치는 주요 요인이다[10].

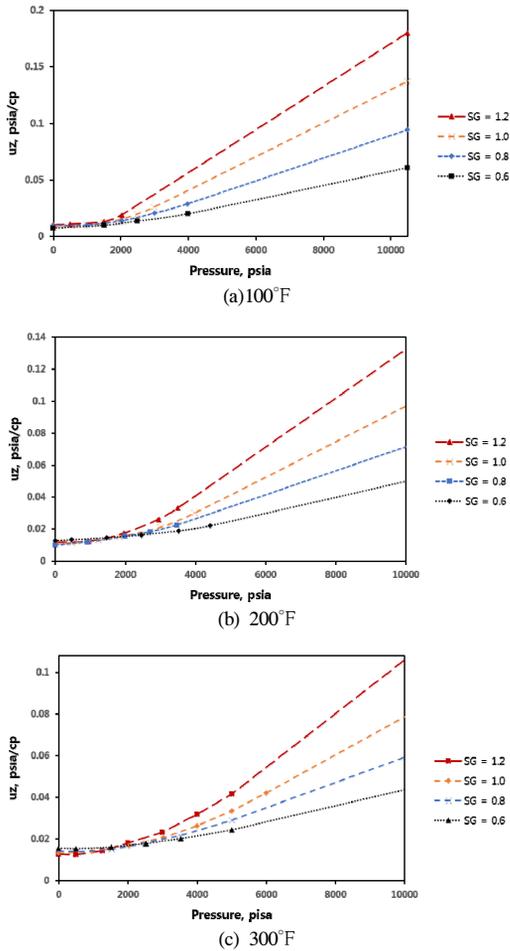


Fig. 2.1. Range of applicability of pressure squared methods at various reservoir temperature (modified from [11]).

저류층 생산성은 저류층의 유동상태인 천이 유동(transient flow), 정상상태 유동(steady state flow) 그리고 유사정상상태 유동(pseudo steady state flow)를 구분하여 수학적으로 모델화 된다. 가스 생산량이 최고점에 도달한 석탄층 메탄가스는 유사정상상태 유동을 띤다.

유사정상상태의 저류층 생산성은 주로 실제가스 유사압력(real gas pseudo pressure)을 이용한 식으로 표현되며 이는 압력에 따라 변화하는 가스점성도,  $\mu$ 와 가스압축인자,  $z$ 을 곱한 값을 고려한다. 하지만 압력에 따른 가스점성도와 가스압축인자를 계산하는 것은 상대적으로 어렵다. 이에 Lee와

Wattenbarger[11]는 압력, 온도 그리고 가스의 비중에 따라  $\mu z$  값을 조사하였다(Fig. 2.1). 그 결과, 온도가 100°F 일 때 1,200 psia, 온도가 200°F 일 때 1,750 psia 그리고 온도가 300°F 일 때 2,200 psia 이하에서는  $\mu z$  값이 거의 일정함을 확인했다. 이 경우에는 평균 가스점성도,  $\bar{\mu}$ 와 평균 가스압축인자,  $\bar{z}$ 를 사용한 저류층 생산성 식인 압력제곱 방법(pressure square) 방법을 사용할 수 있다(식 (1)).

$$q_{sc} = \frac{kh[(\bar{p})^2 - (p_{wf})^2]}{1422 \bar{\mu} \bar{z} T \left[ \ln \frac{r_c}{r_w} - 0.75 + s + Dq_{sc} \right]} \quad (1)$$

석탄층 메탄가스의 비중은 약 0.6이며 본 연구에 사용된 저류층 압력은 1,000 psia 이하이며 저류층 온도는 약 80°F(540°R)이기에 압력제곱 방법을 이용하여 저류층 생산성을 산출하였다.

## 2.2. 석탄층 메탄가스 생산특성

석탄층과 전통가스 저류층의 특성은 서로 상이하다. 전통가스 저류층의 경우, 가스는 압력에 의해 저류층에 압축(compressed)된 상태로 저장되어 있으나 석탄층의 경우, 가스는 석탄입자에 흡착된 상태로 저장되어 있다. 또한 석탄층의 공극 압축도는 전통가스 저류층의 그것보다 약 10의 제곱 규모로 크다[12]. 이러한 이유로, 석탄층 메탄가스전의 저류층 생산성에 영향을 미치는 주된 요소는 흡착과 탄리의 물리적 변화다.

### 압축(compaction)과 석탄입자 수축(matrix shrinkage)

불포화상태의 석탄층에서 가스를 생산하기 위해서는 탈착압력까지 저류층 압력이 감소되어야 하기 때문에 양수과정이 필수적이다. 탄리를 가득 채우고 있던 물이 생산됨에 따라 탄리에 작용하는 유효응력(effective stress)은 증가한다. 그 결과, 탄리의 너비(width or aperture)는 증가하는 유효응력에 의해 줄어들게 되고 투과도는 감소한다. 석탄층 메탄가스에서 이러한 현상을 압축이라 한다.

저류층 압력이 탈착압력까지 감소하면 석탄입자에 흡착되어있던 가스들이 탈착된다. 석탄입자로부터 가스가 탈착됨에 따라 공극 압력은 감소한다. 이로 인해 석탄입자의 크기는 줄어들게 되고 그 결과, 탄리가 넓어짐에 따라 투과도는 증가한다. 석탄층 메탄가스에서 이러한 현상을 석탄입자 수축이라고 한다.

### 2.3. 압력 의존 투과도

석탄층 메탄가스전에서 공극(혹은 탄리)의 압축도는 전통가스전의 압축도보다 약 10의 제곱 규모로 크기 때문에 상대적으로 압력변화에 민감하다. 이러한 이유로 압축 현상과 석탄입자 수축 현상이 발생하여 탄리의 너비는 감소되거나 증가한다. 탄리는 석탄층에 존재하는 유체의 주된 유동통로이다. 결과적으로, 탄리 너비의 변화는 석탄층의 투과도 변화로 이어진다.

#### 2.3.1. Palmer and Mansoori(P&M) 모델

Palmer와 Mansoori[5]가 제안한 모델은 압축 현상과 석탄입자 수축 현상을 모두 고려한 압력 의존 투과도 식이다.

$$\frac{\phi}{\phi_i} = 1 + \frac{c_m}{\phi_i}(p - p_i) + \frac{\varepsilon_\ell}{\phi_i} \left( \frac{K}{M} - 1 \right) \left( \frac{bp}{1+bp} - \frac{bp_i}{1+bp_i} \right) \quad (2)$$

$$c_m = \frac{1}{M} - \left[ \frac{K}{M} + f - 1 \right] \gamma \quad (3)$$

$$\frac{M}{E} = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

$$\frac{K}{M} = \frac{1}{3} \left( \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \right) \quad (5)$$

$$\frac{k}{k_i} = \left( \frac{\phi}{\phi_i} \right)^3 \quad (6)$$

식 (2)은 저류층 압력에 따른 탄리 공극률 변화를 나타낸다. 우변의 2번째 항은 압력 강하에 따른 압축 현상을 표현하고 3번째 항은 석탄입자 수축 현상을 표현한다. 식 (2)과 식 (6)을 결합하여 압력에 따른 탄리 공극률 변화와 그에 따른 투과도 변화를 묘사할 수 있다.

만약 석탄입자 수축 효과가 매우 크다면, 압축현상에 의해 감소하던 투과도는 낮은 저류층 압력에서 다시 상승할 것이다. 즉, 투과도의 반동(rebound)이 시작되는 압력을 식 (7)을 통해 계산할 수 있다.

$$p_{rb} = \sqrt{\frac{0.48 \varepsilon_\ell E}{b}} - \frac{1}{b} \quad (7)$$

#### 2.3.2. Shi and Durucan(S&D) 모델

Shi와 Durucan[6]이 제안한 모델은 P&M 모델처럼 압축 현상과 석탄입자 수축 현상을 모두 고려한 압력 의존 투과도 모델이다. 단, S&D 모델은 저류층 압력에 따른 유효수평응력 변화를 고려하여 압력 의존 투과도를 계산한다.

$$\sigma - \sigma_i = -\frac{v}{1-v}(p - p_i) + \frac{E\alpha_s V_L}{3(1-v)} \left( \frac{bp}{bp+1} - \frac{bp_i}{bp_i+1} \right) \quad (8)$$

식 (8) 우변의 첫 번째 항은 압축 효과를 나타내고 두 번째 항은 석탄입자 수축을 나타낸다. 저류층 압력이 감소함에 따라 첫 번째 항은 양수인 반면에 두 번째 항은 음수가 된다. 따라서 유효수평응력은 반대되는 두 항의 상대적인 값에 의해 결정된다. 즉, 식 (8)은 탈착압력  $p_c$ 에 따라 불포화상태인 식 (8a)와 포화상태인 (8b)로 나누어진다.

$$\sigma - \sigma_i = -\frac{v}{1-v}(p - p_i), \quad p_c < p \ll p_i \quad (8a)$$

$$\sigma - \sigma_i = -\frac{v}{1-v}(p - p_i) + \frac{E\alpha_s V_L}{3(1-v)} \left( \frac{bp}{bp+1} - \frac{bp_i}{bp_i+1} \right), \quad 0 < p \ll p_c \quad (8b)$$

감소하던 투과도가 반등하는 시점의 압력,  $p_{rb}$ 는 식 (9)으로 표현되며 증가하는 투과도가 초기 투과도로 회복되는 시점의 압력,  $p_{rc}$ 는 식 (10)로 표현된다.

$$p_{rb} = \sqrt{\frac{\alpha_s V_L E}{3\nu b}} - \frac{1}{b} \quad (9)$$

$$p_{rc} = \frac{E}{3\nu} \frac{\alpha_s V_L / b}{(p_i + 1/b)} - \frac{1}{b} \quad (10)$$

포화상태, 불포화상태 구분없이 범용적으로 표현되는 식 (11)은 다음과 같다[7].

$$\sigma - \sigma_i = -\frac{\nu}{1-\nu} \frac{(p - p_i)(p - p_{rc})}{p + 1/b} \quad (11)$$

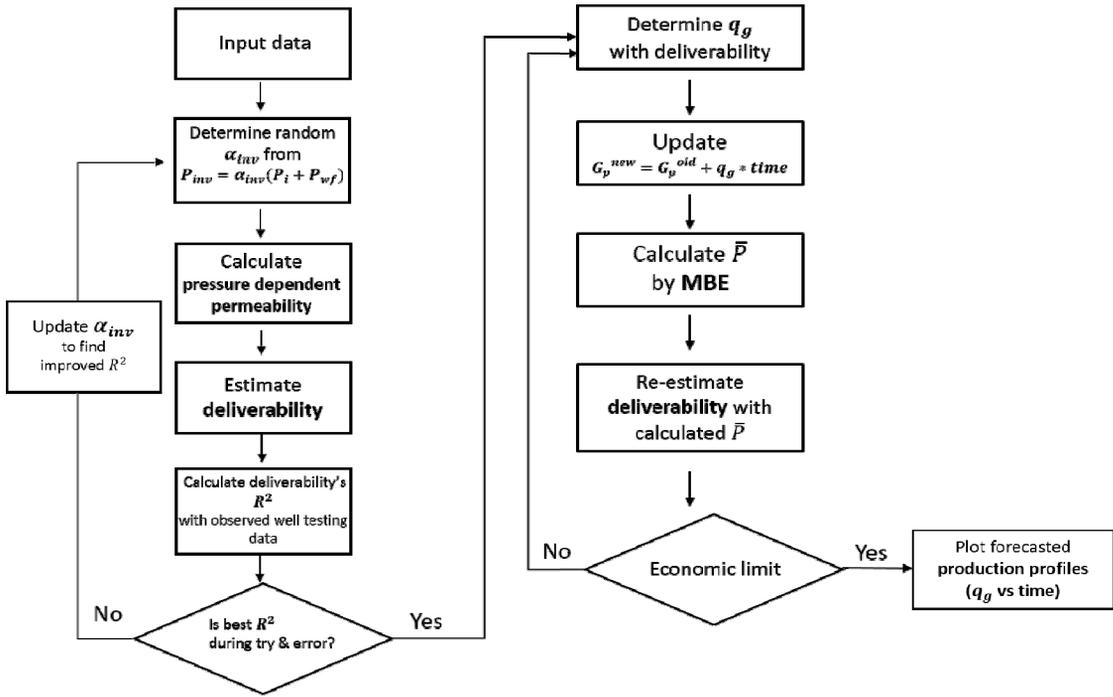


Fig 3.1. Flow chart for the developed model.

Seidle 등[13]은 유효수평응력에 따른 탄리 투과도를 식 (12)로 표현했다. 단, 탄리부피압축도  $C_f$ 는 일정한 것으로 가정한다.

$$k = k_i e^{-3c_f(\sigma - \sigma_i)} \quad (12)$$

Shi와 Durucan[7]은 탄리부피압축도는 유효수평응력에 따라 변화하기 때문에 평균 탄리부피압축도를 고려한 식 (13)을 제안하였다.

$$k = k_i e^{-3\bar{c}_f(\sigma - \sigma_i)}$$

$$\bar{c}_f = \frac{c_{fi}}{\alpha(\sigma - \sigma_i)} \{1 - \exp[-\alpha(\sigma - \sigma_i)]\} \quad (13)$$

식 (11)와 식 (13)을 사용하여 석탄층 메탄가스의 압력 의존 투과도를 계산할 수 있다.

### 2.4. 영향반경 내 저류층 압력 산정

저류층 시뮬레이션을 사용하지 않고 영향반경 내 저류층 압력을 산정하기 위해 다음의 방법을 진행했다.

첫째, 영향반경 내 저류층 압력을 초기 저류층 압력과 공저압력의 관계로 나타냈다(식 (14)). 둘째, 비례상수  $\alpha_{inv}$ 를 임의로 결정하여 영향반경 내 저류층 압력을 산정했다. 셋째, 영향반경 내 저류층 압력을 석탄층 메탄가스전에서의 물질평형법으로 계산하고 이에 따른 압력 의존 투과도를 계산했다. 넷째, 계산된 압력 의존 투과도를 고려하여 저류층 생산성(식 (1))을 산출했다. 마지막으로, 산출된 저류층 생산성이 유정시험 측정치를 충분히 대표할 수 있는지 결정계수( $R^2$ )를 계산하여 전통적인 방법의 저류층 생산성과 비교했다. 위 과정을 시행착오법을 통해 결정계수가 가장 클 때의  $\alpha_{inv}$ 를 선정하여 공저압력이 강하됨에 따른 영향반경 내 저류층 압력  $p_{inv}$ 을 산정하였다.

$$p_{inv} = \alpha_{inv}(p_i + p_{wf}) \quad (14)$$

### 2.5. 석탄층 메탄가스전에서의 물질평형법

물질평형법은 저류층을 하나의 탱크로 가정하고, 탱크 내부에 남아있는 유체의 질량은 탱크 초기에 존재했던 유체의 질량에서 탱크 외부로 유출된 질량의 차이라는 개념으로 유도되며 저류층 평균압

력이나 부존량을 계산할 때 사용된다.

석탄층 메탄가스는 자유가스양이 매우 적고 대부분 흡착된 가스로 존재한다. 이러한 이유로 전통적인 물질평형법을 석탄층 메탄가스에 수정없이 사용하는 것은 맞지 않다. 이러한 이유로 Seidle[2]은 석탄층 메탄가스에 사용 가능한 물질평형식을 제안하였다(식 (15)).

$$G_p = 0.04356 Ah \phi_f (1 - S_{wi}) \frac{1}{B_{gi}} \quad (15)$$

$$+ 1.360 \times 10^{-3} V_m \rho_B Ah \frac{bp_i}{1 + bp_i}$$

$$+ 5.615 \frac{W_e - W_p}{B_w}$$

$$- 0.04356 Ah \phi_f (1 - S_{wi}) \frac{1}{B_g}$$

$$- 1.360 \times 10^{-3} V_m \rho_B Ah \frac{bp}{1 + bp}$$

식 (15) 우변의 첫 번째 항은 초기조건에서 탄리에 존재하는 자유가스양이며 두 번째 항은 초기조건에서 석탄매질에 흡착되어있는 가스양이다. 세 번째 항은 생산되는 물의 양이며 네 번째 항과 마지막 항은 평균 저류층 압력일 때, 각각 탄리에 남아있는 자유가스양과 석탄매질에 흡착되어 남아있는 가스양이다. 만약 두 번째 항과 마지막 항을 고려하지 않으면 이는 물이 생산되는 전통가스전의 물질평형식이 된다.

실제로 석탄층 메탄가스전의 주변부에 존재하는 가스정은 종종 외부로부터 물이 유입된다. 하지만 비교적 중앙에 있는 가스정은 양수과정이 끝나면 유입되는 물의 양이 없어 물은 거의 생산되지 않는다. 즉, 가스 생산량이 최고점에 도달하면 물이 생산되지 않아 식 (15)의 세 번째 항은 일정하게 된다.

### III. 모델 개발 및 결과

개발된 모델을 이용하여 석탄층 메탄가스전에서, 저류층 압력이 강하함에 따라 변화하는 투과도를 계산하고 이를 고려한 저류층 생산성을 산출하였다. 산출한 저류층 생산성과 전통적인 방법의 저류층 생산성을 유정시험 측정치를 기준으로, 결정계수를 사용하여 서로 비교하였으며 그 결과, 석탄층 메탄가스전의 생산성을 대표할 때 압력 의존 투과도를 고려한 저류층 생산성이 더 적합함을 확인하였다. 더 나아가, 산출한 저류층 생산성과 앞 절에서 제시한

물질평형법을 이용하여 시뮬레이션 작업 없이 생산거동을 예측하였다(Fig 3.1). 모델결과에는 문헌들에 제시된 미국 Warrior 분지의 Deerlick Creek CBM 가스전과 Brookwood CBM 가스전의 현장자료가 사용되었다[2, 8].

#### 3.1. Deerlick Creek CBM 가스전

영향반경 내 저류층 압력을 산정하기 위해 비례상수  $\alpha_{inv}$ 를 0.1부터 0.5까지 0.1씩 증가시켜 임의의 값을 선정하였다. 단,  $\alpha_{inv}$ 가 0.5를 초과할 시, 영향반경 내 저류층 압력이 초기 저류층 압력보다 큰 값이 도출될 수 있는데, 이는 물리적으로 맞지 않아 0.5까지 수행하였다.

각 값 별로, 석탄층의 투과도를 감소시키는 압축현상과 투과도를 증가시키는 석탄입자 수축현상을 동시에 고려할 수 있고 가장 널리 알려진 P&M와 S&D 모델을 사용하여 압력 의존 투과도를 계산하였다. 사용된 현장자료는 Thungsuntonkhun와 Engler가 제시한 자료 중 저류층 물성과 암석역학적 물성(Table 3.1)을 사용하였다.

그 후, Seidle[2]이 제시한 저류층 물성과 유체물성(Table 3.2)을 사용하여 압력제곱 방법으로 압력

**Table 3.1** Reservoir and rock mechanic properties of Deerlick Creek field [8]

Property	Value
$p_i$	225 psia
$k_g$	12 md
$\phi_f$	0.01
b	0.0016 psia <sup>-1</sup>
E	5.59 × 10 <sup>5</sup> psia
$\epsilon_l$	0.0128
$\nu$	0.245
f	0.5
$\gamma$	0
$\alpha$	-1.5 × 10 <sup>-3</sup> psia <sup>-1</sup>
$\alpha_s V_L$	0.01266 ft <sup>3</sup> /ton
$c_{fi}$	1.5 × 10 <sup>-4</sup> psia <sup>-1</sup>

의존 투과도를 고려한 저류층 생산성을 도출하였다. 단, 본 논문에 명시된 스킨인자,  $s$ 는 유정시험을 통해 산출한 값을 흡착 압축도(adsorption compressibility)를 반영하여 보정한 것이다[2]. 그 후 도출된 저류층 생산성을 유정시험 측정치를 기준으로, 결정계수를 통해 전통적인 방법의 저류층 생산성과 비교하여 비례상수  $\alpha_{inv}$ 를 결정하였다. 전통적인 방법의 저류층 생산성은 영향반경 내 저류층 압력과 관계없이 투과도는 일정하기에  $\alpha_{inv}$ 값과 관계없이 저류층 생산성은 동일하여 결정계수는 항상 0.69이었다.  $\alpha_{inv}$ 가 0.1, 0.2 그리고 0.3일 때, 압력 의존 투과도를 고려한 저류층 생산성의 결정계수가 전통적인 방법을 이용한 저류층 생산

성의 결정계수보다 작은 값이 도출되었다. 하지만  $\alpha_{inv}$ 가 0.4일 때, P&M 모델을 이용한 저류층 생산성의 결정계수는 0.69, S&D 모델을 적용한 저류층 생산성의 결정계수는 0.71로, 전통적인 방법의 저류층 생산성보다 개선된 결과가 도출되었다. 마지막으로  $\alpha_{inv}$ 가 0.5 일 때, 전자의 경우 0.76, 후자의 경우 0.75로 가장 높은 결정계수가 도출되었다 (Table 3.3).

이러한 결과를 통해 석탄층 메탄가스전의 유정 시험 측정치를 대표하는 저류층 생산성을 산출할 때, 압력 의존 투과도가 고려된 저류층 생산성이 압력강하에 따른 일일 생산량을 대표하는데 적합함을 확인하였다.

다음의 결과들은  $\alpha_{inv}$ 가 0.1에서 0.5 중 결정계수가 가장 큰,  $\alpha_{inv}$ 가 0.5일 때 Deerlick Creek 현장의 결과이다.

P&M 모델을 사용했을 때 투과도는 최대 1.15배 증가했으며 S&D 모델은 1.12배 증가했다(Fig 3.2). 반등압력  $p_{rb}$ 는 P&M 모델은 840 psia며 S&D 모델은 1,828 psia이다. 해당 현장의 포아송비는 0.245 인데 P&M 모델은  $p_{rb}$ 를 계산할 시, 식 (7)과 같이 포아송비를 고려하지 않으며 S&D 모델은 식(9)와 같이  $p_{rb}$  계산식의 분모에 입력되어 두 모델의  $p_{rb}$  값은 차이가 크게 나타났다. 각 모델의  $p_{rb}$  값을 기준으로, 그 압력 이상에서는 압축 현상이 우세하기 때문에 탄리 간격이 줄어들어 투과도가 감소하는 경향이며 그 압력 이하에서는 석탄입자 수축 현상이 우세하여 투과도는 증가하는 경향이다. 해당 현장은 초기 저류층 압력이 225 psia으로 두 모델의  $p_{rb}$ 보다 낮기 때문에 투과도 증가율은 지속적으로 증가하는 경향을 띈다.

Fig. 3.3는 전통적인 방법을 사용한 저류층 생산성과 P&M 그리고 S&D 모델을 사용해서 계산한

**Table 3.2** Reservoir and fluid properties of Deerlick Creek field [2]

Property	Value
Area	360 acres
$p_i$	225 psia
$k_g$	12 md
$h$	3 ft
$r_w$	0.36 ft
$s$	-3
T	540 ° R
$\mu$	0.0133 cp
$z$	0.85
D	0

**Table 3.3** Coefficient of determination with various  $\alpha_{inv}$  of Deerlick Creek field

$\alpha_{inv}$	$R^2$ of P&M model deliverability	$R^2$ of S&D model deliverability	$R^2$ of conventional deliverability
0.1	0.0499	0.5095	0.6907
0.2	0.3680	0.5898	
0.3	0.5730	0.6600	
0.4	0.6979	0.7167	
0.5	0.7659	0.7577	

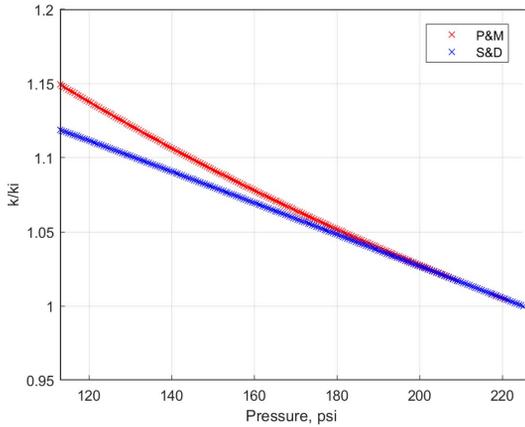


Fig. 3.2. Deerlick Creek field pressure dependent permeability with P&M and S&D model.

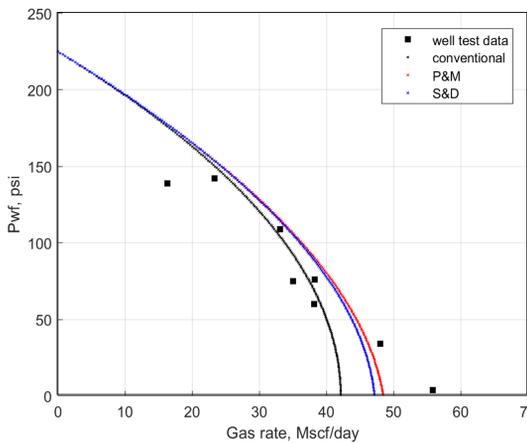


Fig. 3.3. Deliverability of Deerlick Creek field with conventional method, P&M and S&D model.

압력 의존 투과도를 고려한 저류층 생산성이다. 공저압력이 150 psia 일 때, 모든 저류층 생산성의 일일 생산량은 약 25 Mscf/day로 유사했다. 하지만 25 psia 일 때, 전통적인 저류층 생산성의 일일 생산량은 42 Mscf/day, P&M 모델을 이용한 저류층 생산성의 경우 47.5 Mscf/day, S&D 모델을 이용한 저류층 생산성의 경우 48 Mscf/day로 서로 차이를 보였다. 이는 압력 의존 투과도를 고려한 저류층 생산성의 경우, 압력강하에 따라 투과도가 증가하여 산출되는 일일 생산량이 증가하기 때문이다. 또한 압력 의존 투과도를 고려한 저류층 생산성이 전통적인 저류층 생산성보다, 유정시험의 측

정치들의 마지막 두 점을 반영하는데 적합하기 때문에 높은 결정계수가 산출되었다.

### 3.2. Brookwood CBM 가스전

Brookwood CBM 현장의 경우, 유정시험 측정치가 존재하지 않아 결정계수를 통한  $\alpha_{inv}$ 를 선정할 수 없었다. 해당 현장과 Deerlick Creek 현장은 동일한 Warrior 분지 내에 존재하기에 Deerlick Creek 현장의  $\alpha_{inv}$  값인 0.5로 결정하였다.

압력 의존 투과도를 계산할 시, Seidle[2]이 제시한 자료(Table 3.4)를 사용했으며 초기 저류층 압력과 초기 투과도 외의 물성은 Deerlick Creek 현장의 물성과 동일하다. 그 이유는 두 문헌 모두 Warrior 분지의 전형적인 암석역학적 물성과 Langmuir 물성을 이용했기 때문이다.

P&M 모델을 사용했을 때, 투과도는 최대 1.17배 증가했으며 S&D 모델은 1.14배 증가했다(Fig 3.4).  $p_{rb}$ 는 두 모델 모두 Deerlick Creek 현장의 결과와 동일했는데 이는 두 현장의 암석역학적 물성과 Langmuir 물성이 동일하기 때문이다. 또한 S&D 모델의 투과도 증가 추세는 직선에 가까웠으며, P&M 모델의 투과도는 저류층 압력이 300 psia 이상에서는 S&D 모델보다 낮은 투과도 값이 계산되었다. 하지만 300 psia 일 때, 투과도 증가율은 약 1.08배로 S&D 모델과 동일했다. 300 psia 이하 압력에서는 P&M 모델의 투과도 증가 추세가 증가하여 S&D 모델의 투과도 값보다 큰 값이 산출되었다.

Deerlick Creek과 Brookwood 현장의 최대 투과도 증가율은 P&M 모델을 사용했을 때 1.15, 1.17로 S&D 모델보다 높게 산출되었다. Seidle[14]에 따르면, San Juan 분지 석탄층에서 관찰된 물성을 사용했을 때 최대 투과도 증가율은 P&M의 경우 2배, S&D 모델은 100배로 S&D 모델이 더 높게 산출되기도 한다. P&M 모델은 변형률 기반(strain based)의 모델이며 S&D 모델은 응력 기반(stress based) 모델로서 석탄층의 투과도 변화를 서로 다르게 표현하고 있다. 분석 대상 석탄층의 투과도가 일반적인 석탄층의 투과도보다 높고 저류층 압력이 낮아 투과도 변화는 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

저류층 생산성을 산출할 시 Seidle[2]이 제시한 자료(Table 3.5)가 사용되었다. 산출된 Brookwood 현장의 저류층 생산성 특이점은 공저압력이 300 psia 일 때, P&M과 S&D 모델의 일일 생산량은 약 148 Mscf/d로 동일하다. 하지만 압력차이가 점점 증가하면서 공저압력이 25 psia 일 때, P&M 모델의 경우 318 Mscf/d 그리고 S&D 모델의 경우 310

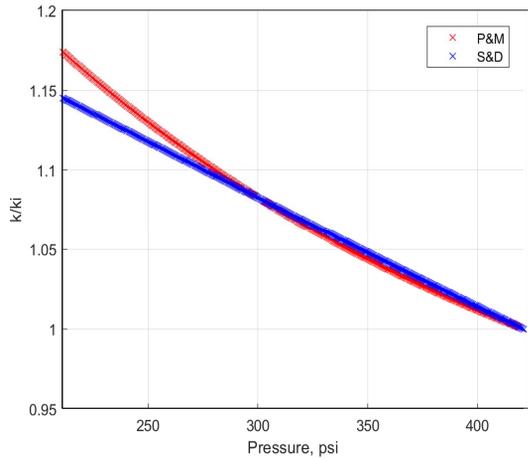
**Table 3.4** Reservoir and rock mechanic properties of Brookwood field [2]

Property	Value
$p_i$	421 psia
$k_g$	12.5 md
$\phi_f$	0.01
b	$0.0016 \text{ psia}^{-1}$
E	$5.59 \times 10^5 \text{ psia}$
$\epsilon_l$	0.0128
$\nu$	0.245
f	0.5
$\gamma$	0
$\alpha$	$-1.5 \times 10^{-3} \text{ psia}^{-1}$
$\alpha_s V_L$	$0.01266 \text{ ft}^3/\text{ton}$
$c_{fi}$	$1.5 \times 10^{-4} \text{ psia}^{-1}$

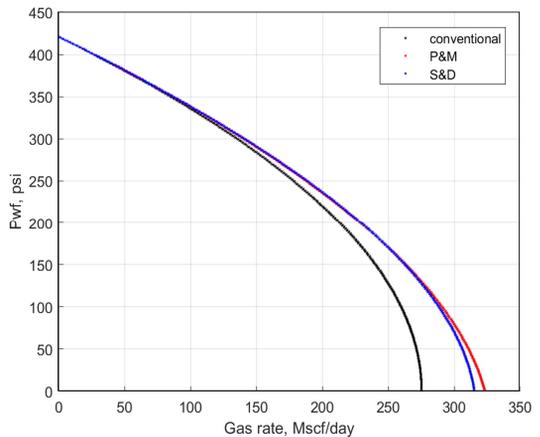
**Table 3.5** Reservoir and fluid properties of Brookwood field [2]

Property	Value
Area	100 acres
$p_i$	421 psia
$k_g$	12.5 md
h	5 ft
$r_w$	0.25 ft
s	-3
T	$540 \text{ }^\circ R$
$\bar{\mu}$	0.0128 cp
$\bar{z}$	0.88
D	0

Mscf/d로 P&M 모델의 일일 생산량이 S&D 모델보다 큰 값이 도출된다(Fig. 3.5). 이는 초기 저류층



**Fig. 3.4.** Brookwood field pressure dependent permeability with P&M and S&D model.



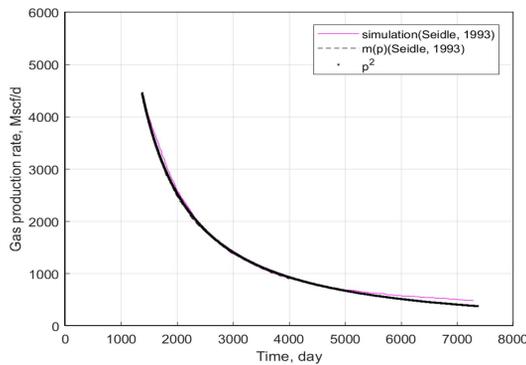
**Fig. 3.5.** Deliverability of Brookwood field with conventional method, P&M and S&D model.

압력 주위 구간에서는 두 모델의 투과도가 유사하지만, 300 psia 이하에서는 P&M의 투과도가 S&D 모델의 투과도보다 높아지기 때문이다.

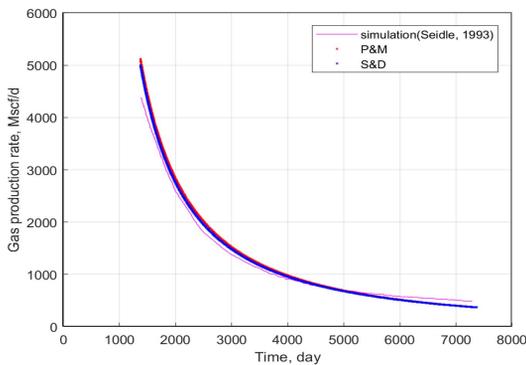
이 현상은 마지막 생산단계에 들어선, 즉 더 이상 물이 생산되지 않는 단계이기 에 식 (15)에서 우변의 세 번째 항은 무시하였다. Brookwood 현장의 물성은 Seidle[2]이 제시한 자료를 사용하였다 (Table 3.6). 또한 생산거동을 예측할 시, 이와 동일한 물성을 가진 가스정 31개를 해당현장에 존재하는 것으로 가정하여 수행했다.

**Table 3.6** Coal and well properties for MBE of Brookwood field [2]

Property	Value
$A$	100 acres
$h$	5 ft
$\phi_f$	0.01
$V_m$	1278.8 scf/ton
$b$	$0.0016 \text{ psia}^{-1}$
$\rho_B$	1.3 g/cc
$p_i$	305 psia
$p_{wf}$	25 psia



**Fig. 3.6.** Predicted production profiles for model validation.



**Fig. 3.7.** Predicted production profiles of Brookwood field.

생산이 시작된 시점의 저류층 압력, 즉 초기 저류층 압력은 421 psia며 생산거동 예측 시작지점에서의 저류층 압력은 305 psia다. 저류층 압력이 421 psia에서 305 psia까지 강하하는 동안 생산이 진행되었지만 물 생산량을 알 수 없고 정확한 누적 가스생산량을 알 수 없다는 한계가 존재했다. 이런 이유로, 저류층 압력은 305 psia인 상태로 향후 저류층 압력 및 생산거동을 예측하였다.

저류층 압력이 305 psia일 때 저류층 생산성을 산출, 공저압력이 25 psia일 때의 일일 생산량  $q_g$ 를 계산하고 1절에서 소개한 방법인 유동물질평형법을 이용하여 향후 생산거동을 예측하였다.

모델을 검증하기 위해 압력제곱 방법을 사용하여 예측한 생산거동과 Seidle[2]의 실제가스 유사 압력을 통해 예측한 생산거동을 비교한 결과, 그 차이가 미비하였다(Fig. 3.6).

압력제곱 식을 이용한 P&M 방법, S&D 방법 그리고 전통적인 방법으로 도출한 저류층 생산성을 이용하여 약 15년간의 생산거동을 예측하여 문헌의 결과와 비교하였다(Fig. 3.7). 생산거동 초기, 해당 현장의 총 일일 생산량은 문헌결과 대비, P&M 모델의 경우 약 700 Mscf/d 그리고 S&D 모델은 약 600 Mscf/d 증가하였다. 문헌의 생산거동은 투과도가 일정한 반면에, 개발된 모델에서는 투과도가 P&M 모델에서 최대 약 1.17배, S&D 모델에서 최대 약 1.14배 증가하기 때문에 일일 생산량이 높게 산출되었다. 생산이 진행됨에 따라, 평균 저류층 압력이 감소하여 공저압력과의 차는 점점 작아져 투과도 변화가 미비해지기 때문에 일일 생산량은 문헌의 결과와 유사한 양상을 띄게 된다.

Palmer 와 Mansoori[5], Shi 와 Durucan[6,7]의 연구에 적용된 현장과 같이 압력 의존 투과도가 25배 혹은 6배 증가하는 경우, 생산거동은 전통가스전의 그것과 매우 큰 차이가 나타날 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 물이 더 이상 생산되지 않는 석탄층 메탄가스전 혹은 생산 시작단계부터 물이 생산되지 않는 건성 석탄층 메탄가스전을 대상으로 수행하였다. 석탄층의 탄리 투과도 변화를 묘사한 P&M과 S&D 모델을 사용하여 압력 의존 투과도를 계산하고 이를 고려한 저류층 생산성을 산출했다. 그 후, 물질평형법을 이용하여 시뮬레이션 없이 생산거동을 예측하였다.

##### 1. Deerlick Creek과 Brookwood 현장의 압력

의존 투과도를 계산했다. 각 현장별 최종 투과도는 초기 투과도에 비해, P&M 모델은 최대 1.15배와 1.17배 그리고 S&D 모델은 1.12배와 1.14배 증가하였다. 두 현장의 초기 저류층 압력은 225 psia, 421 psia로 그 차이가 크지만 압력 의존 투과도 변화는 유사한 결과가 도출되는데, 이는 두 현장의 암석 역학적 물성과 Langmuir 물성이 Warrior 분지의 물성으로 유사하기 때문이다.

2. 석탄층 메탄가스전에서 저류층 생산성을 산출할 때, 영향반경 내 저류층 압력과 압력 의존 투과도를 고려하는 것이 적합하다. 유정시험 측정치를 대표하기 위해, 전통적인 방법의 저류층 생산성과 본 연구를 통해 산출한 저류층 생산성을 비교하였다. 전통적인 방법의 저류층 생산성의 결정계수는 0.69, P&M 모델의 경우 0.76 그리고 S&D 모델의 경우에는 0.75이었다. 즉, 석탄층 메탄가스전의 영향반경 내 저류층 압력에 따른 압력 의존 투과도를 고려한 저류층 생산성이 유정시험 측정치를 대표하는데 더 적합함을 확인하였다.

3. Brookwood 현장의 생산거동을 약 1,300일부터 향후 15년 간 예측하여 문헌에 제시된 시물레이션 결과와 비교해보았다. Brookwood 현장의 투과도는 P&M 모델의 경우 최대 1.17배, S&D 모델의 경우 1.14배 증가하여 현장 규모의 일일 생산량이 문헌 결과 대비, 최대 약 700 Mscf/d, 후자의 경우 약 600 Mscf/d 높은 생산거동이 도출되었다. Shi와 Durucan[6,7]과 Palmer와 Mansoori[5]의 연구와 같이 압력 의존 투과도가 25배, 6배 증가하는 석탄층 메탄가스전의 경우, 모델을 통해 예측된 생산거동은 전통가스전의 생산거동과 차이가 더욱 클 것으로 예상된다.

4. 본 연구는 입력자료의 불확실성이 큰 시물레이션을 수행하지 않고 압력 의존 투과도를 고려하여 석탄층 메탄가스 생산정의 생산거동을 예측할 수 있다는 것에 의의가 있다. 그러나 석탄층 메탄가스 저류층의 특성인 가스 흡, 탈착 효과, 모암과 탄리의 투과도 등을 직접적으로 고려하지 않았다는 한계가 있어 향후 추가적인 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서 제안한 방법은 유효투과도가 높은 석탄층에서 적용 시 유의미한 예측 성능을 보일 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2018년도 산업통상부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20182510102500)

### 사용기호

- $A$  : drainage area [acres]
- $B_{gi}$  : initial gas formation volume factor [ $ft^3/scf$ ]
- $\bar{B}_g$  : gas formation volume factor at average reservoir pressure [ $ft^3/scf$ ]
- $\bar{B}_w$  : water formation volume factor at average reservoir pressure [Rb/stb]
- $c_f$  : cleat-volume compressibility [ $psia^{-1}$ ]
- $\bar{c}_f$  : average cleat-volume compressibility [ $psia^{-1}$ ]
- $c_{fi}$  : cleat-volume compressibility at initial reservoir pressure [ $psia^{-1}$ ]
- $D$  : non-Darcy flow constant [day/Mscf]
- $E$  : Young's modulus [psia]
- $f$  : a fraction  $0 \rightarrow 1$
- $G_p$  : cumulative gas production [MMscf]
- $h$  : net pay thickness [ft]
- $k$  : permeability [md]
- $k_{g\prime}$  : coalbed effective permeability to gas [md]
- $k_i$  : permeability at initial reservoir pressure [md]
- $K$  : bulk modulus [psia]
- $M$  : constrained axial modulus [psia]
- $p$  : reservoir pressure [psia]
- $\bar{p}$  : average reservoir pressure [psia]
- $p_c$  : critical sorption pressure [psia]
- $p_e$  : external boundary pressure [psia]
- $p_i$  : initial reservoir pressure, [psia]
- $p_{inv}$  : reservoir pressure within the radius of investigation [psia]
- $p_{rb}$  : rebound pressure [psia]
- $p_{rc}$  : recovery pressure [psia]
- $p_{wf}$  : bottomhole pressure [psia]
- $q_{sc}$  : gas production rate [Mscf/day]
- $r_e$  : radius of investigation [ft]
- $r_w$  : radius of wellbore [ft]
- $s$  : skin factor
- $S_{wi}$  : initial water saturation
- $T$  : reservoir temperature [ $^{\circ}R$ ]
- $V_L$  : Langmuir volume [scf/ton]
- $V_m$  : monolayer saturation volume [scf/ton]

$W_e$  : cumulative water influx [stb]  
 $W_p$  : cumulative water production [stb]  
 $z$  : gas compressibility factor  
 $\bar{z}$  : average gas compressibility factor

### 그리스 문자

$\alpha$  : cleat volume compressibility-decline rate  
 [psia<sup>-1</sup>]  
 $\alpha_{inv}$  : proportional factor  
 $\alpha_s$  : volumetric matrix-shrinkage coefficient  
 [ft<sup>3</sup>/scf]  
 $\gamma$  : grain compressibility [psia<sup>-1</sup>]  
 $\varepsilon, b$  : parameters of Langmuir curve match to  
 volumetric strain change because of ma-  
 trix shrinkage [ $\varepsilon$  = dimensionless,  $b$  =  
 psia<sup>-1</sup>]  
 $\mu$  : gas viscosity [cp]  
 $\bar{\mu}$  : average gas viscosity [cp]  
 $\nu$  : Poisson's ratio  
 $\rho_B$  : bulk coal density [g/cc]  
 $\sigma$  : effective horizontal stress [psia]  
 $\sigma_i$  : in-situ effective horizontal stress [psia]  
 $\phi$  : natural fracture porosity  
 $\phi_i$  : porosity at initial reservoir pressure  
 $\phi_f$  : cleat porosity

### REFERENCES

- [1] Shin, H.D., Lee, G.S., Lee, D.S., Jang, I.S. and Park, C.H., *Unconventional Resources Engineering*, CIR, Seoul, Republic of Korea, (2015)
- [2] Seidle, J.P., "Long-term gas deliverability of a dewatered coalbed", *Journal of Petroleum Technology*, 45(06), 564-569, (1993)
- [3] Schlumberger, *Coalbed Methane: Clean Energy for the World*, U.S.A, 4-13, (2009)
- [4] AGR, 2018.12.05., [www.agr.com/snackbox/blog/gas-production-from-coal-bed-methane](http://www.agr.com/snackbox/blog/gas-production-from-coal-bed-methane)
- [5] Palmer, I., and Mansoori, J., "How Permeability Depends on Stress and Pore Pressure in Coalbeds: A New Model", *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1(06), 539-544, (1998)
- [6] Shi, J.Q. and Durucan, S., "Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery", *Transport in porous media*, 56(1), 1-16, (2004)
- [7] Shi, J.Q. and Durucan, S., "Exponential growth in San Juan Basin Fruitland coalbed permeability with reservoir drawdown: model match and new insights", *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 13(06), 914-925, (2010)
- [8] Thungsuntonkhun, W. and Engler, T.W., "Well Deliverability of Undersaturated Coalbed Reservoir", *SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference*, Keystone, Colorado, 21-23 May, 7-11, (2001)
- [9] Feng, Q. and Shi, H. and Zhang, X. and Du, P. and Zhang, J., "New Inflow Performance Relationship for Coalbed Methane Wells", *SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition*, Vienna, Austria, 20-22 March, 1-11, (2012)
- [10] Kwon, S.I., Kwon, O.G., Sung, W.M., Shin, H.D., Lee, G.S. and Lee, J.H., *Petroleum Production Engineering*, Gumibook, Seoul, (2014)
- [11] Lee, W.J., and Wattenbarger, R.A., *Gas Reservoir Engineering*, SPE, Texas, (1996)
- [12] Fekete, 2018.12.05., [http://www.fekete.com/SAN/WebHelp/FeketeHarmony/Harmony\\_WebHelp/Content/HTML\\_Files/Reference\\_Material/General\\_Concepts/CBM\\_Proper\\_ties.htm](http://www.fekete.com/SAN/WebHelp/FeketeHarmony/Harmony_WebHelp/Content/HTML_Files/Reference_Material/General_Concepts/CBM_Proper_ties.htm)
- [13] Seidle, J.P., Jeansonne, M.W. and Erickson, D.J., "Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals", *SPE Rocky Mountain Regional Meeting*, Casper, Wyoming, 18 - 21 May, 433-444, (1992)
- [14] Seidle, J., *Fundamentals of COALBED METHANE Reservoir Engineering*, PennWell, Oklahoma, (2011)