KIGAS Vol. 19, No. 2, pp 37~44, 2015
(Journal of the Korean Institute of Gas)
http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2015.19.2.37

흡착에 의한 석탄암체의 부피변화가 고려된 흡착모델 개선 및 부피변형률 예측

김상진 · †성원모
한양대학교 자원환경공학과
(2015년 3월 9일 접수, 2015년 4월 15일 수정, 2015년 4월 16일 채택)

Development of Volume Modified Sorption Model and Prediction for Volumetric Strain of Coal Matrix

Sang-Jin Kim · †Won-Mo Sung
Dept. of Natural Resource and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea
(Received March 9, 2015; Revised April 15, 2015; Accepted April 16, 2015)

요 약

본 연구에서는 CBM의 1차 생산뿐 아니라 CO_2나 N_2주입을 통한 ECBM, 혹은 지중저장을 목적으로 석탄층에 CO_2를 주입할 때 발생할 수 있는 암체의 부피변화 영향을 고려하여 기존의 Langmuir 흡착 관계식을 개선하였다. 본 모델의 검증을 위해 CO_2나 CH_4, N_2의 단일성분 흡착실험 데이터에 기존 Langmuir 모델값과 본 모델의 결과값을 비교하였다. 그 결과, 기존 모델에서는 흡착용량이 큰 석탄일수록, 흡착친화도가 큰 가스일수록 실험값과 모델값 사이의 오차가 커지는 경향이 나타났지만 본 모델에서는 모든 조건에서 실험결과를 잘 묘사하였고 본 모델을 통해 예측한 부피변형률 역시 실험값과 유사함을 확인하였다. 이렇게 개선된 단일성분 흡착모델을 혼합가스의 흡착모델인 IAS 모델에 적용하여 부피변화가 고려된 IAS모델로 개선하였다. 그 결과 혼합가스에 대한 흡착거동 역시 기존 모델에 비해 정확도를 높였고 이는 Hall 등(1994)이 수행한 혼합가스의 흡착실험결과와의 매칭을 통해 확인하였다.

Abstract - We proposed the improved Langmuir adsorption relations considering volume change effect of coal matrix during primary production of CBM and Enhanced-CBM with injection of carbon dioxide or CCS in coalseam but also volumetric strain. To verify this model, experimental data of pure gas adsorption such as CO_2, CH_4, and N_2 on coals were used to compare conventional Langmuir model with this model. From the results, we obtained that the larger adsorption capacity of coal and the higher adsorption affinity of gas, the larger error occur with Langmuir model. Using this model, however, we found not only substantially better fit in all condition but also reasonable volumetric strain of the coal matrix. We also applied this volume modified pure gas adsorption model to the IAS model to describe gas adsorption and volumetric strain for mixed gas. This modified-IAS model fitting experimental data by Hall et al(1994) improved accuracy of mixed gas adsorption calculation compared with conventional model.

Key words : volume modified adsorption isotherm, volumetric strain, pure gas, mixture gas, ECBM

†Corresponding author:wmsung@hanyang.ac.kr
Copyright ⓒ 2015 by The Korean Institute of Gas

I. 서 론

석탄 저류층이 일반적인 재래식 저류층과 다른 가장 큰 차이점 중 하나는 가스저장 메커니즘이다. 석탄층 내 저장되어있는 가스들은 대부분 흡착된 상태로 존재하며 저류층 조건에 따라서, 혹은 석탄의 성숙도에 따라 암체에 흡착될 수 있는 최대흡착용량이 달라진다. 또한 석탄 저류층은 낮은 투과성으로 인해 재래가스전에 비해 회수율이 낮은 단점을 가지고 있다[1]. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 CO_2, N_2등의 가스 주입 회수증진공법이 연구되어 왔으며 일반적으로 석탄표면에 CO_2가 흡착할 수 있는 용량은 CH_4보다 2배에서 10배, N_2가 흡착할 수 있는 용량은 CH_4의 ⅕에서 ⅘ 정도이다[2].

석탄 저류층이 재래식 저류층과 다른 또 하나의 특징은 가스의 흡 · 탈착에 의한 석탄 암체의 수축 또는 팽창과 같은 부피변화(Fig. 1(a))이다. 뿐만 아니라, 탄성이 크고 미세공극이 잘 발달된 구조의 석탄과 같은 매질에서는 공극압력과 주변압력의 차이인 유효응력에 의해 암체가 압축 또는 팽창(Fig. 1(b))되기도 한다[2]. 이러한 현상들이 동시에 작용하여 석탄 암체의 부피변형을 유발할 수 있고 이는 흡착량 계산 시 오차를 야기할 뿐만 아니라 저류층 투과도의 급격한 변화를 야기할 수 있다[3].

Lin 등(2008)은 특정 온도 조건에서 CO_2를 주입하는 경우 석탄 입자에 흡착되어 있던 CH_4보다 더 많은 양의 CO_2 흡착에 의해 석탄 암체가 팽창하여 가스의 주 유동 경로인 석탄층 내 균열 공간이 축소되고 이에 따라 투과도가 감소되는 현상을 실험 연구를 통해 밝혔다[4].

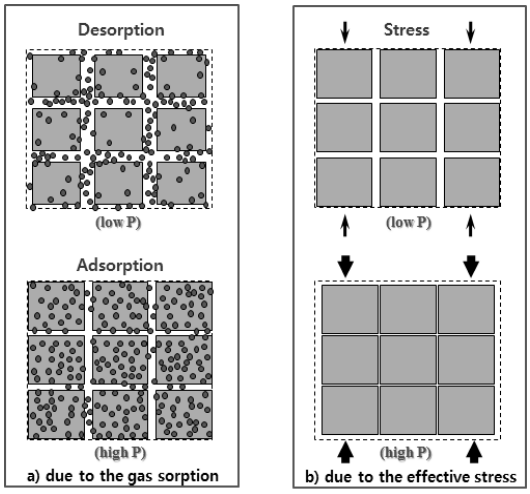


Fig. 1. Causes of volumetric strain of coal matrix.

Ozdemir 등(2004)은 석탄암체의 부피측정에서 불확실성을 야기하는 요소에는 가스분자의 크기에 따라 미세공극간의 통로에 침투성이 다른 sieving 효과, 고압에 의한 암체의 압축 정도, 가스가 암체 내부로 흡수되는 현상, 흡착유체의 밀도 측정의 어려움 등이 있는 것으로 보고하였다. 또한 상기한 요인 전체를 하나의 부피변화 항으로 가정하여 기존의 흡착관계식을 개선하였다[5].

본 연구에서는 기존의 흡착관계식에 흡착으로 인한 부피변형만큼 자유공간부피(*Vvoid*)에서 제외하고 흡착상으로 인한 부피변형을 보정하여 흡착등온모델을 개선하였다. 이 모델을 실험값 및 기존의 Langmuir 모델의 결과값과 비교, 분석하였다. 또한 본 연구의 모델을 활용하여 석탄층의 투과도 변화의 원인중 하나인 흡 · 탈착에 의한 부피변화 양상을 예측하고자 하였다.

II. 흡착등온모델 개발

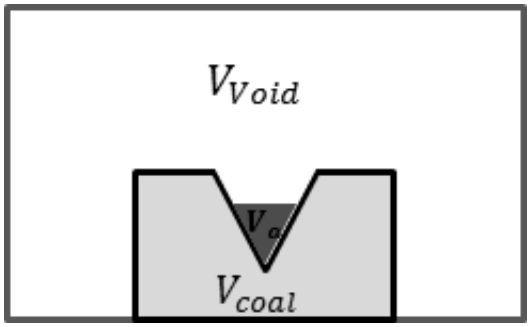
2.1. 단일성분 순수가스

고체표면에 흡착되는 가스의 양을 실험적으로 측정하기 위해 Langmuir, Dubinin 등에 의해 고안된 방법은 현재까지도 널리 이용되고 있다(Fig. 2(a)).

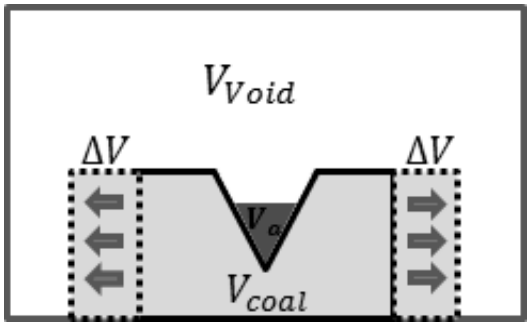
이를 수식으로 표현하면 다음과 같다[5].

$$n_{ex} = n_{abs} - \rho_g V_a = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right) \cdot n_{abs} \quad (1)$$

여기서, n_{ex}는 초과흡착량(excess adsorption), n_{abs}는 절대흡착량(absolute adsorption), V_a는 흡착상(adsorbed phase)의 부피이며, ρ_g, ρ_a는 각각 가스와 흡착상의 밀도를 나타낸다. 실험을 통해 측정되는 초과흡착량(n_{ex})에는 흡착상의 부피가 고려되어 있지 않으므로 이를 보정하여 절대흡착량(n_{abs})을 계산한다. 이와 같은 방식으로 구축된 흡착등온선은 석탄층 메탄가스의 매장량 계산 및 압력변화에 의한 생산추이 분석에 사용되어지고 있다. 하지만 식 (1)을 이용한 흡착량 계산에는 실험 중 발생 가능한 시료의 부피변화가 고려되어 있지 않다. 석탄층과 같이 흡착이 주된 가스저장 메커니즘인 저류층에 대해 보다 정확한 흡착등온선을 얻기 위해서는 부피변화와 같은 암체고유의 물리적 특성이 필수적으로 반영되어야 한다.



(a) measurement of the adsorption isotherm without volume change effect



(b) measurement of the adsorption isotherm with volume change effect

Fig. 2. Construction of adsorption isotherm.

흡착실험 과정에서 암체의 부피가 변화될 수 있는 요인은 두 가지로 설명할 수 있다. 첫 번째로, 암체 내부로 침투한 가스분자가 미세공극 표면으로 흡착되거나 암체 내부로 흡수되어 액체상과 유사한 흡착층을 형성하면 압력구배가 발생되고 이는 암체의 구조적 변화를 일으키기에 충분한 힘으로 작용할 수 있다[6-7]. 두 번째로, 석탄시료가 포함된 셀 내부에 가스가 주입되어 압력이 증가하면 유효응력에 변화가 발생하고 이는 암체 내부 미세균열들의 수축을 야기할 수 있다[8-10]. 이 두 가지 요인에 의한 부피변화는 일반적으로 서로 반대 방향으로 작용한다. 이러한 암체의 부피변화는 흡착실험 시 초기에 헬륨가스로 측정한 자유공간부피(*Vvoid*)의 변화를 야기해 흡착량 계산 시 오차를 유발한다(Fig. 2(b)). 따라서 본 연구에서는 암체의 부피증가량(*ΔV*)을 자유공간부피(*Vvoid*)에서 제외하고 그만큼의 흡착상의 부피를 추가해줌으로써 암체의 변화된 부피를 보정해 주었다. 이를 수식으로 표현하면 식 (1)은 다음과 같이 재구성된다.

$$n_{ex} = n_{abs} - \rho_g V_a - \rho_g \Delta V_x + \rho_a \Delta V_x$$

$$= \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a}\right) \cdot [n_{abs} + \rho_a \frac{\Delta V}{V_i}] \quad (2)$$

위 식에서 우변의 $[n_{abs} + \rho_a(\Delta V / V_i)]$를 n'_{abs}라 하면 식 (1)과 같은 형태임을 알 수 있다. 하지만 여기서의 n_{abs}는 총 흡착량 중 부피변화에 관여하지 않는 흡착량, $\rho_a(\Delta V / V_i)$는 부피변화를 야기하는 흡착량 또는 흡수량으로 볼 수 있다. 식 (2)에서 부피변형률 $(\Delta V / V_i)$는 압력에 따라 선형 변화하는 것으로 가정하였다. Walker 등(1984)은 실험연구를 통해 석탄의 부피변형률은 압력에 선형적으로 변화하는 양상을 보고한 바 있다[7]. 또한 Robertson과 Christiansen(2005)은 CO_2 가스로 770 psia의 압력까지 흡착실험을 수행한 결과, 역청탄에서는 1%, 아역청탄에서는 2%의 부피변화가 압력에 선형적으로 발생함을 보고하였다[11].

본 모델의 계산과정을 살펴보면, 우선 실험값을 기존의 Langmuir 모델에 적용하여 Langmuir 계수들을 결정한다. 이를 초기값으로 설정한 후, 압력에 대한 부피변형률의 기울기를 시행착오법을 이용하여 변화시켜가며 실험값과 모델값의 오차를 확인한다. 매 반복단계마다 Langmuir 계수들은 업데이트되며, 부피변형률은 실험값과 모델값 사이의 오차가 최소일 때의 값으로 결정된다. 이 결과로부터 절대흡착량 n'_{abs}과 부피변형률이 계산된다.

2.2. 다성분 혼합가스

다성분 혼합가스에서 각 가스의 흡착량을 계산하기 위해 사용되는 대표적인 흡착모델에는 Extended Langmuir(EL)모델과 Ideal Adsorbed Solution(IAS) 모델이 있다. 식의 단순함과 편리한 적용성으로 EL 모델이 널리 사용되고 있지만 넓은 범위의 압력이나 3가지 이상의 가스가 혼합된 경우 IAS 모델이 EL모델보다 더 정확한 값을 계산해 내는 것으로 알려져 있다[12]. IAS모델은 혼합가스의 흡착상을 가스상과 평형에 있는 용액으로 간주하는 이론으로 액체에 대한 기본 열역학방정식들이 흡착상에 적용된다고 가정한다. 이는 이상(ideal)용액에 대한 라울의 법칙과 유사하다[13].

$$P y_i = P_i'(\pi) x_i \quad (3)$$

$$\pi = \frac{\pi_i A}{RT} = \int_0^P \frac{n_{abs}'(P)}{P} dP \quad (4)$$

여기서 x_i, y_i는 각각 성분 i에 대한 흡착상과 가스상의 몰분율이다. A, R, T는 각각 흡착포텐셜, 기체상수, 절대온도를 의미한다. 또한 π_i는 성분 i에 대한 퍼짐압력(spreading pressure)으로 흡착가스가 고체표면에 퍼지면서 줄어드는 표면장력을 나타낸다[13]. 이 식은 다음과 같은 조건식을 만족시킴으로써 완성된다.

$$\sum_{i=1}^{nc} x_i = 1 \qquad \sum_{i=1}^{nc} y_i = 1 \tag{5}$$

$$\frac{1}{(n_a)_t} = \sum_{i=1}^{nc} \frac{x_i}{n'_i} \tag{6}$$

$$(n_a)_i = x_i\,(n_a)_t \tag{7}$$

여기서 $(n_a)_t$는 혼합가스의 총 흡착량을 의미하고 $(n_a)_i$는 혼합가스 중 성분 i의 흡착량을 나타낸다. 혼합가스 내 각 성분의 퍼짐압력은 각 성분의 절대흡착량을 압력에 대해 적분함으로써 계산되며, 기존 IAS 모델에서는 퍼짐압력의 계산을 위해 Langmuir 모델을 적분하는 방식이 가장 널리 이용된다. 본 연구에서는 퍼짐압력의 계산을 위해 부피변화가 고려된 절대흡착량(n'_{abs})을 이용함으로써 부피변화가 고려된 수정 혼합가스 흡착모델(modified-IAS; mIAS)을 유도하였다.

Ⅲ. 결과 분석

3.1. 순수가스 수정-흡착모델의 검증

본 연구에서 개발한 수정흡착모델을 이용하여 계산된 CO_2의 흡착량 값을 기존의 Langmuir 모델 결과값 및 실험값과 비교하였다(Fig. 3).

여기서 실험값은 Lin 등(2008)이 Powder River Basin의 Wyodak Anderson coal (아역청탄)을 이용해 CO_2가스의 흡착량 측정 및 이에 의한 암체의 부피변형률을 측정한 값이다. 이 결과에서 볼 수 있듯이, Langmuir 모델의 경우 압력이 300 psia일 때의 흡착량은 실험값보다 18.5% 크고 압력이 770 psia일 때는 11.5% 작은 것으로 나타났다. 반면에 부피변형이 고려된 본 모델을 이용하여 계산한 흡착량은 300 psia의 압력일 때 흡착량은 실험값보다 0.5% 크게, 770 psia일 때는 0.8% 작게 계산되어 Langmuir 모델에 비해 훨씬 실험값에 근사함을 알 수 있다.

한편, 본 모델로 계산한 부피변형률은 압력증가에 따라 선형적으로 증가하며, 실험값과 모델 계산값 사이에 좋은 매칭을 확인할 수 있었다. 압력이 770 psia에 도달했을 때 모델로 계산한 부피변형률은 초기시료부피 대비 7.2%가 증가한 것으로 나타났다. 이는 실험을 통해 측정된 값 6.7%와 유사함을 알 수 있다(Fig. 3).

이번에는 CO_2, CH_4, N_2의 단일성분 순수가스에 대한 흡착 계수를 본 모델과 Langmuir 모델을 통해 계산하였고, 이를 Hall 등(1994)이 수행한 순수가스 흡착실험값과 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

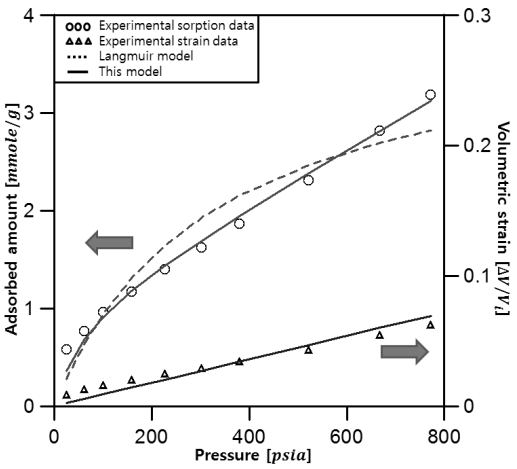


Fig. 3. Single component sorption isotherm and volumetric strain.

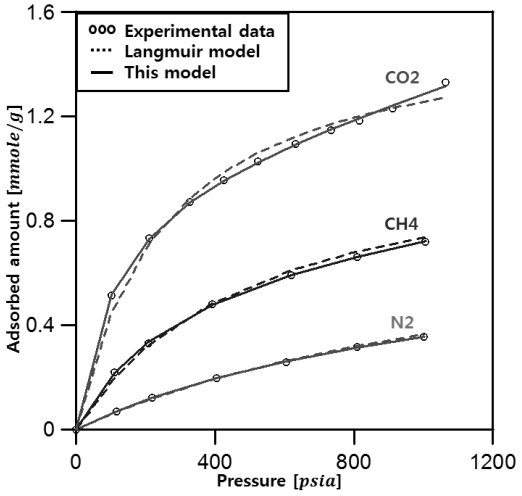


Fig. 4. Comparison of Langmuir model and this model with experimental data.

실험 자료는 Hall 등(1994)이 온도 45℃, 상압에서 1015 psia까지의 압력범위에서 San Juan Basin의 wet Fruitland coal(중휘발분 역청탄)에 대해 CO_2와 CH_4, N_2의 단일성분 순수가스 흡착실험의 결과이다. 이 결과에서 볼 수 있듯이, Langmuir 모델의 경우 세 가지 가스 중 흡착친화도가 가장 큰 CO_2가스일 때 실험값과 오차가 가장 크고, N_2일 때 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 부피변형을 고려한 본 모델의 경우, CO_2, CH_4, N_2 모두 실험값과 잘 일치됨을 볼 수 있다.

3.2. 혼합가스 수정-흡착모델의 검증

다성분 혼합가스에 대해 본 연구에서 개발한 mIAS 모델을 EL모델과 비교하여 혼합가스의 흡착거동 양상을 분석하였다. 이때 적용된 각 단일성분 가스의 흡착계수값은 Table 1에 정리하였다. 이 결과를 CO_2-CH_4, CO_2-N_2, CH_4-N_2의 혼합가스에 대한 Hall 등(1994)의 흡착실험결과와 비교하였다. 이 결과중 대표적으로 CO_2-CH_4 혼합가스의 혼합비율 8:2와 2:8의 경우에 대해 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다.

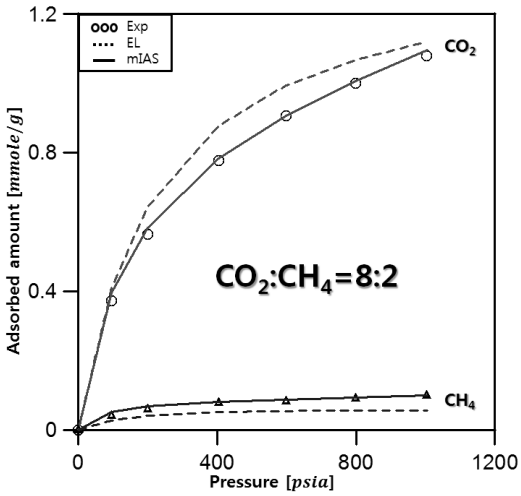
이 결과는 Fig. 5에서 보듯이, CO_2와 CH_4의 혼합비율 8:2의 경우, EL모델에서는 CO_2의 흡착량은 실험값보다 크게, CH_4는 작게 계산되었다. 한편, CO_2와 CH_4의 혼합비율이 2:8인 경우, 즉 흡착친화도가 CO_2에 비해 상대적으로 작은 CH_4의 몰분율이 더 큰 경우 EL모델은 보다 더 큰 오차를 야기하는 것으로 확인되었다. 하지만 본 연구에서 개발한 mIAS모델에서는 압력이나 혼합가스의 몰분율에 상관없이 모든 범위에서 EL모델 보다 실험값에 더 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

한편, 본 모델로 계산한 부피변형률을 보면 Fig. 6에서 볼 수 있듯이, CO_2-CH_4 혼합가스의 혼합비율이 8:2일 때 흡착량의 대부분이 CO_2이기 때문에 총 야기된 부피변형률 역시 대부분이 CO_2에 의한 것임을 알 수 있다. 즉 압력이 증가할수록 총 부피변형률 역시 증가하여 1015 psia에서 초기부피 대비 2.4% 증가한 것으로 나타났다. 반면 혼합비율이 2:8인 혼합가스에서는 1015 psia의 압력에서 1.9%의 부피증가가 발생한 것으로 나타났다(Fig. 6). 이 경우 두 가스의 절대적인 흡착량

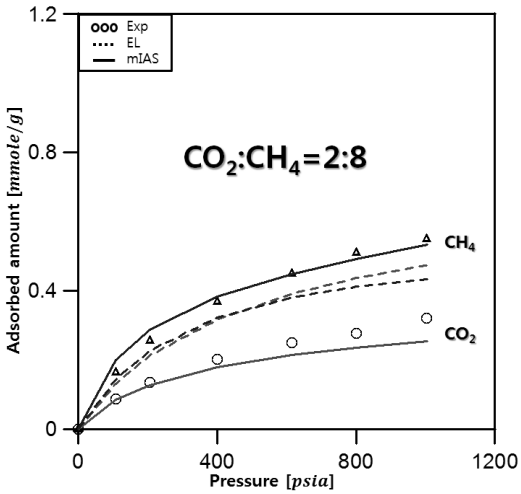
은 CH_4가 많지만 여전히 CO_2에 의한 변형률이 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 흡착친화도, 분자크기, 석탄 품위에 따른 미세공극의 분포 등에 의해 CO_2가 CH_4보다 암체로 더 잘 침투할 수 있으며 이를 통해 암체를 변형시킬 수 있는 정도가 CH_4보다 높기 때문이다. 이는 Toda 등(1972)의 연구에서

Table 1. Coefficients of two models

	Langmuir model			this model		
	P_L	n_L	$\Delta V/V$	P_L	n_L	$\Delta V/V$
CO_2	254.7	1.57	NA	109.5	0.987	2.5E-4
CH_4	511.1	1.11	NA	224.6	0.598	1E-5
N_2	1378	0.86	NA	1053	0.656	2E-6

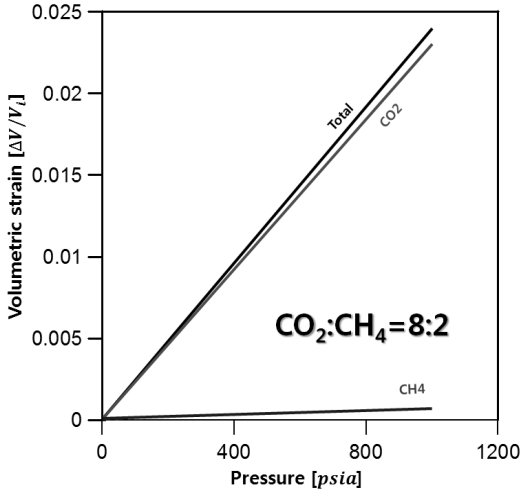


(a) CO_2 : CH4 = 8:2 mixture

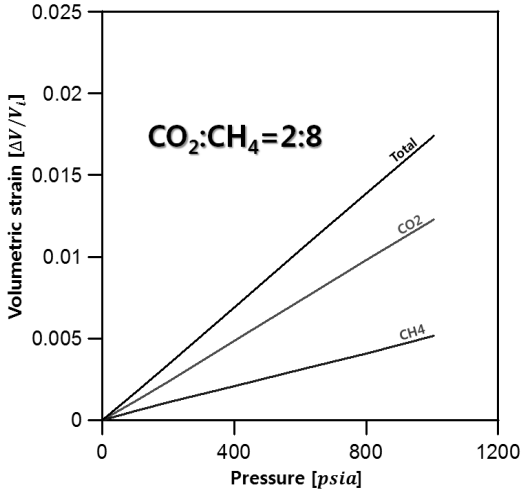


(b) CO_2 : CH4 = 2:8 mixture

Fig. 5. Comparison of IAS model and this model with experimental data.



(a) Volumetric strian for CO_2 : CH_4 = 2:8 mixture



(b) Volumetric strian for CO_2 : CH_4 = 2:8 mixture

Fig. 6. Volumetric strain by this model.

도 잘 나타나 있는데, 여러 가지 품위의 석탄에 대해 헬륨가스와 CO_2를 이용한 암체부피 측정실험 결과, 가스 종류별로 가스가 침투가능한 공극의 크기가 달라서 암체의 부피가 다르게 측정됨을 확인하였다 [14].

3.3. 가스 주입이 흡착과 부피변화에 미치는 영향

석탄층에서의 메탄가스 생산 증진을 위해 CO_2나 N_2를 주입하면 저류층 내의 가스 몰분율이 변화되는데, 이때 주입된 CO_2와 N_2는 각각 다른 양상으로

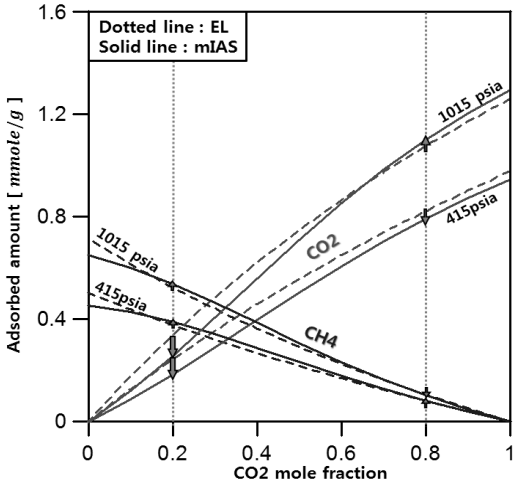


Fig. 7. The effect of CO_2 mole fraction on adsorption behavior of CO_2-CH_4 mixture.

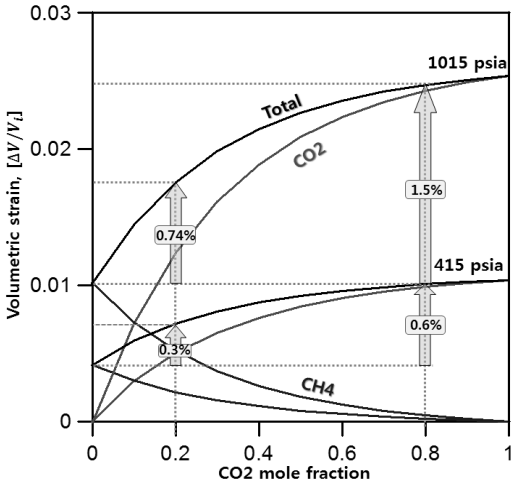


Fig. 8. The effect of CO_2 mole fraction on volumetric strain of coal matrix.

CH_4를 탈착시킨다. 이러한 영향을 알아보기 위해 주입 가스별 몰분율에 따른 흡착과 부피변형률을 분석하였다.

첫 번째로, CO_2-CH_4 혼합가스의 몰분율에 따른 흡착량과 부피변형률을 각각 Fig. 7과 8에 나타내었다. 초기에 CH_4로 포화된 석탄층에 CO_2가 주입되기 시작하면 두 가스의 흡착친화도 차이에 의해 CH_4는 탈착되어 배출되고 더 많은 양의 CO_2가 흡착되는

치환이 발생한다. Fig. 7에서 보듯이, 415 psia의 압력조건으로 CO_2가 주입되어 암체 내의 CO_2 몰분율이 0.2가 되었을 때 본 연구의 mIAS모델을 통해 계산한 CH_4의 흡착량은 EL모델보다 3% 크게, CO_2는 25.2% 작게 계산되어 두 모델간에 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. CO_2의 지속적인 주입으로 그 몰분율이 0.8에 도달했을 때, CH_4의 흡착량은 1% 크게, CO_2는 3.6% 작게 산출되었다. 또한 1015 psia의 압력조건으로 CO_2가 주입되기 시작하여 그 몰분율이 0.2가 되면 mIAS모델로 계산한 CH_4의 흡착량은 EL모델보다 2.6% 크게, CO_2는 24.3% 작게 계산되었으며 CO_2의 몰분율이 0.8까지 증가하면 mIAS모델로 계산한 CO_2의 흡착량은 EL모델에 비해 2.3% 크게, CH_4는 3.7% 작게 산출되었다. 이러한 결과는 석탄층에서 치환이 주된 메커니즘인 CO_2 주입공법의 경우, 기존모델로 생산량이나 CO_2의 주입량을 예측하여 설계할 경우 상당한 오차를 발생시킬 수 있음을 나타낸다.

CO_2 주입으로 인한 암체의 총 부피변형률 결과는 Fig. 8에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이, 압력 415 psia일 때 초기에 메탄으로 포화된 상태를 기준으로 CO_2 몰분율이 0.2에서 0.3% 증가되었고 CO_2의 몰분율이 0.8로 증가하면 0.6%가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 압력 1015 psia에서는 CO_2 몰분율이 0.2일 때 0.74% 증가되었고, CO_2의 지속적인 주입으로 몰분율이 0.8로 증가되면 초기부피 대비 약 1.5%가 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 흡착친화도가 CH_4 보다 큰 CO_2의 주입으로 인해 흡착량이 증가해 암체의 팽창이 발생한 것을 확인할 수 있었고 높은 압력에서 더 많은 양의 가스가 흡착되므로 부피변형률 역시 고압에서 더 크게 나타날 수 있음을 예상할 수 있다. 이러한 석탄 암체의 부피증가는 암체 내부의 미세공극이나 균열의 공간을 감소시켜 투과도가 작아지는 효과를 야기하게 된다.

다음으로 흡착친화도가 CH_4보다 낮은 N_2를 주입가스를 이용한 석탄층 메탄가스 회수증진공법에 대해 분석하였다. 석탄층 내로 주입된 N_2는 흡착되어 있는 CH_4의 부분압력을 낮추어 탈착을 용이하게 한다. N_2 주입에 의한 흡착양상과 부피변형률 양상을 Fig. 9, 10에 각각 도시하였다.

Fig. 9를 살펴보면, 상대적으로 흡착친화도가 큰 CH_4의 그래프에서는 그 흡착량이 많을 때, 즉 압력이 높거나 CH_4의 몰분율이 커질 때 기존 EL모델과 본 연구의 mIAS모델 간에 차이가 나타났지만 흡착친화도가 작은 N_2의 경우 두 모델 간에 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 이는 N_2가 암체의 부피변화를 거의 야기하지 않기 때문에 기존모델과 본

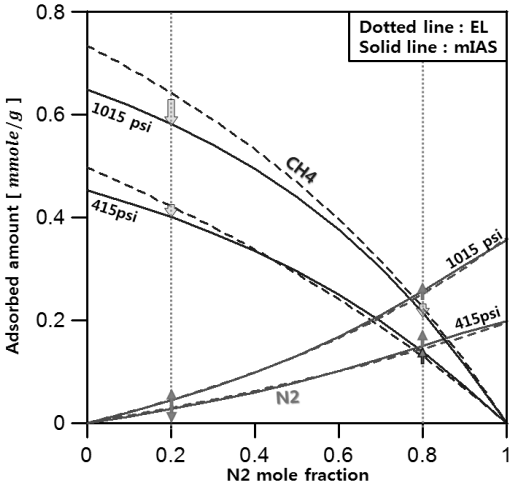


Fig. 9. The effect of CO_2 mole fraction on adsorption behavior of CO_2-CH_4 mixture.

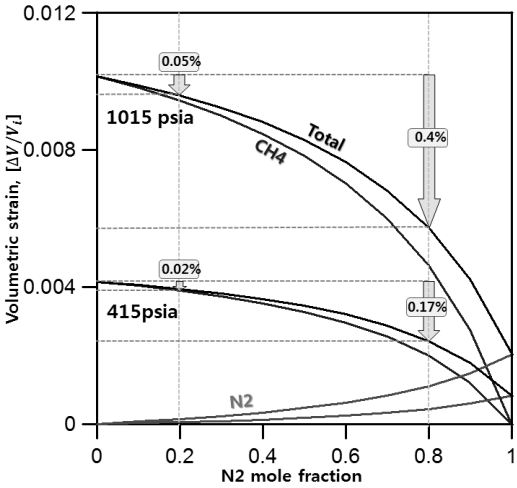


Fig. 10. The effect of N_2 mole fraction on volumetric strain of coal matrix.

모델이 유사한 결과를 계산해 냄으로 해석된다. Fig. 10에 나타난 암체의 부피변형률은 N_2의 주입으로 그 몰분율이 증가할수록 초기 CH_4으로 포화된 부피를 기준으로 점점 감소하는 양상으로 나타났다. 이는 N_2의 주입량이 증가하더라도 흡착되는 양은 적은데 비해 CH_4의 탈착량은 많아져 암체의 수축이 발생할 수 있음을 본 모델이 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 석탄층 메탄가스의 흡착량 계산 시 암체의 부피변화를 고려해 줌으로써 보다 정확한 흡착양상을 계산하고 그때의 부피변형률을 예측하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출한 결과는 다음과 같다.

(1) 순수가스 흡착 시 가스의 흡착친화도가 클수록 실험값과 Langmuir모델 계산값 사이의 오차가 커지는 경향이 나타났으나 본 모델에서는 모든 조건에서 실험값과 유사한 결과를 계산해 내었다.

(2) 본 모델을 이용하면 흡착실험자료를 이용하여 압력증가에 따른 부피변화양상을 예측할 수 있었고 이는 선행연구에서 수행한 부피변화실험의 결과와 상당히 유사한 양상을 계산해 내었다.

(3) CO_2-CH_4 혼합가스의 흡착 시 절대적인 흡착량은 CH_4가 많더라도 CO_2에 의한 변형률이 더 클 수 있다. 이는 CO_2가 CH_4보다 암체로 더 잘 침투할 수 있으며 이를 통해 암체를 변형시킬 수 있는 정도가 CH_4보다 높기 때문이다.

(4) CH_4로 포화된 석탄저류층에 CO_2 주입시 암체 팽창이나 N_2 주입에 의한 암체 수축 현상이 본 모델을 통해 잘 묘사됨을 확인할 수 있었다.

(5) 본 모델을 이용하여 저류층의 압력 혹은 저류층 내 가스 조성에 따른 흡착량을 기존모델보다 정확하게 계산할 수 있었고 그때 발생될 수 있는 부피변화의 양상을 예측할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부에서 시행한 "석탄층 메탄가스 자원화 엔지니어링 핵심기술(증진/포집/정제) 개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

[1] Kim, K.H., Sung, W. M. and Han, J. M., "The Analysis of ECBM Efficiency about Sorption Rate between CH_4 and CO_2" KIGAS., **14**(2), 36-43, (2013)

[2] St.George, J. D. and Barakat, M. A., "The Change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal", International Journal of Coal Geology, **45**(2-3), 105-113, (2001)

[3] Karacan, C.O., "Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO_2 sorption", International Journal of Coal Geology, **72**(3-4), 209-220, (2007)

[4] Lin, W., Tang, G. Q., and Kovscek, A. R., "Sorption-Induced Permeability Change of Coal During Gas-Injection Processes", SPE Reservoir Evaluation & Engineering, **11**(4), 792-802, (2008)

[5] Ekrem O., Badie I. M., and Karl S., "CO_2 adsorption capacity of argonne premium coals", Fuel, **83**(13), 1085-1094, (2004)

[6] Van Krevelen, D. W., "*Coal*", Elsevier, N.Y., (1961).

[7] Walker, P. L. J., Davis, A., Verma, S. K., Rivera-Utrilla, J., and Khan, M. R., "Data base for the analysis of compositional characteristics of coal seams and macerals", Final report, PennState university, State College, PA, (1984)

[8] Harpalani, S. and Zhao, X., "The Unusual Response of Coal Permeability to Varying Gas Pressure and Effective Stress", *Rock Mechanics as a Guide for Effective Utilization of Batural Resources*, ed. Rotterdam, Balkema, (1989)

[9] Stefanska, C. G., "Influence of Carbon Dioxide and Methane on Change of Sorption, and Dilatometric Properties of Bituminous Coals", Archiwum Gornictwa, **35**(1), 105-113, (1990)

[10] Seidle, J. P., Jeansonne, M. W., and Erickson, D. J., "Application of Matchstick Geometry to Stress Dependent Pemeability in Coals", SPE Rocky Mountain Regional Meeting, (1992)

[11] Robertson E.P. and Christiansen R.L., "Modeling Permeability in Coal Using Sorption-Induced Strain Data", SPE Annual Technical Conference and Exhibition, (2005)

[12] Hall, F.E., Chunhe, Z., Gasem, K.A.M., Robinson, R.L., and Dan, Y., "Adsorption of Pure Methane, Nitrogen, and Carbon Dioxide and Their Binary Mixtures on Wet Fruitland Coal", SPE Eastern Regional Meeting, (1994)

[13] Myers A.L. and Prausnitz J.M., "Thermodynamics of Mixed-Gas Adsorption", AIChE, **11**(1), 121-127, (1965)

[14] Toda, Y., "Densities of coals measured with various liquids", Fuel, **51**,108-112, (1972)