

석탄층 내 이산화탄소 지중 저장에 대한 단열 간격의 영향 수치 모델링

김창수¹ · 이성호¹ · 김준모^{1,*} · 김중휘²

¹서울대학교 지구환경과학부
²중원대학교 자원순환환경공학과

요 약

석탄층 내에 주입된 이산화탄소에 의한 유체(지하수, 이산화탄소, 메탄)의 거동(유동, 확산, 흡착) 및 저장 기작을 통합적으로 분석하고 이에 대한 단열 간격의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 다상 열-수리-화학적 수치 모델을 이용한 일련의 수치 모델링을 수행하였다. 또한 수치 모델링에 한국 석탄층의 특성을 반영하기 위하여 삼척탄전 자료를 분석하여 사용하였다. 수치 모델링 결과는 단열 간격이 이산화탄소 및 메탄의 단열 내 유동, 기질 내 확산 및 기질 내 흡착에 중요한 영향을 미침을 보여준다. 그 결과 단열 간격의 변화에 따라서 이산화탄소 주입에 의한 석탄층 메탄 회수 증진 및 이산화탄소 흡착 포획의 시공간적 양상이 다르게 나타난다. 이는 단열 간격이 증가할수록 단열의 공극률과 고유투수계수 및 기질의 형태 계수가 감소하기 때문이다. 한편 단열 간격에 상관없이 주입 종료 직후에 주입된 이산화탄소의 대부분이 기질에 흡착 저장되며, 이는 석탄층의 이산화탄소 지중 저장 효율이 매우 높음을 보여준다. 이는 모든 경우에서 단열 내 이산화탄소가 유동과 거의 동시에 기질로 확산되기에 충분한 확산 속도를 가지기 때문이다.

주요어: 이산화탄소, 지중 저장, 석탄층, 석탄층 메탄 회수 증진, 이산화탄소 흡착 포획, 단열 간격, 수치 모델링

Chang-Soo Kim, Sungho Lee, Jun-Mo Kim and Jung-Hwi Kihm, 2014, Numerical modeling of impacts of cleat spacing on geologic storage of carbon dioxide in coal beds. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 6, p. 797-810

ABSTRACT: A series of numerical modeling is performed using a multi-phase thermo-hydro-chemical numerical model to analyze integratedly behavior (flow, diffusion, adsorption) and storage mechanisms of fluids (groundwater, carbon dioxide, methane) due to carbon dioxide injection in coal beds and to evaluate quantitatively impacts of the cleat spacing on such behavior and storage mechanisms of fluids. In addition, the data of the Samcheok Coalfield are analyzed and used in the numerical modeling to reflect the characteristics of the Korean coal beds. The results of the numerical modeling show that the cleat spacing has significant impacts on carbon dioxide and methane flow in the cleat and their diffusion and adsorption in the matrix. As a result, the temporal and spatial distributions of enhanced coal bed methane recovery (ECBM) and adsorption trapping of carbon dioxide occur differently depending on the cleat spacing. This arises because the porosity and intrinsic permeability of the cleat and the shape factor of the matrix decrease as the cleat spacing increases. On the other hand, regardless of the cleat spacing, most of injected carbon dioxide is adsorbed in the matrix right after the end of carbon dioxide injection showing a very high efficiency of geologic storage of carbon dioxide in coal beds. This arises because the diffusion rate in the matrix is fast enough for carbon dioxide to flow in the cleat flow and to diffuse in the matrix almost simultaneously.

Key words: carbon dioxide, geologic storage, coal beds, enhanced coal bed methane recovery (ECBM), adsorption trapping of carbon dioxide, cleat spacing, numerical modeling

(Chang-Soo Kim, Sungho Lee and Jun-Mo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea; Jung-Hwi Kihm, Department of Resources Recycling and Environmental Engineering, Jungwon University, Goesan-Gun 367-805, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-2-880-8190, E-mail: junmokim@snu.ac.kr

1. 서 론

대기 중 이산화탄소 농도는 산업 혁명 이후 화석 연료 사용으로 인해 급격히 늘어났으며, 많은 전문가들은 이와 같은 이산화탄소 농도의 증가를 지구 온난화(global warming)와 기후 변화(climate change)의 주요 원인으로 여기고 있다. 이에 세계 각국은 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention of Climate Change, UNFCCC)을 통해 일부 선진국에 대한 온실가스 배출 감축을 의무화하였으며, 이산화탄소 처분에 필요한 기술 개발 및 시행을 위한 노력이 전 세계적으로 진행 중이다. 국내에서도 대한민국이 차기 온실가스 의무 감축 후보국이라는 점과 탄소 배출권 시장에 대한 대비가 필요하다는 점에서 이산화탄소 처분 기술에 대한 관심이 높아지고 있다.

이산화탄소 처분을 위한 방법으로써의 이산화탄소 지중 저장은 많은 양의 이산화탄소를 장기간에 걸쳐 안정적으로 저장할 수 있다는 점에서 가장 효율적인 방법으로 평가받고 있다. 이산화탄소 지중 저장은 심부 대염수층(deep saline aquifers), 고갈되거나 현재 개발 중인 석유·가스층(depleted and active oil and gas reservoirs) 및 채산성이 없는 석탄층(unmineable coal beds) 내에서 수행되고 있으며, 일부에서는 현무암층과 석회암층 내 이산화탄소 지중 저장에 대한 연구가 진행 중이다(Metz *et al.*, 2005). 이러한 이산화탄소 지중 저장 대상 지층의 종류는 아직 개발 초기 단계인 현무암층과 석회암층을 제외하면 크게 사암층과 석탄층이며, 이 중에서 석탄층은 사암층(대염수층, 석유·가스층)에 비해 우수한 흡착 저장 성능(adsorption storage capacity)과 석탄층 메탄 회수 증진(enhanced coal bed methane recovery, ECBM) 기법을 통해 생산된 메탄으로 이산화탄소 지중 저장 비용을 상쇄할 수 있다는 장점으로 인해 전 세계적으로 유망한 이산화탄소 지중 저장 대상 지층으로 주목받고 있다(Metz *et al.*, 2005).

국외에서는 이와 같은 석탄층 내 이산화탄소 지중 저장을 시행하기 위해 중국, 캐나다, 미국, 뉴질랜드, 호주, 폴란드, 체코 등에서 석탄층의 이산화탄소 저장 용량 평가, 부지 특성화 및 이산화탄소와 메탄의 유동과 흡착 저장 능력에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(예, Wong *et al.*, 2007; Gentzis and Bolen, 2008; Ross *et al.*, 2009; Zarrouk and Moore, 2009; Wei *et al.*, 2010; Busch and Gensterblum, 2011;

Weniger *et al.*, 2012). 반면에 국내에서는 석탄층 메탄 회수(coal bed methane recovery, CBM)를 위한 국내 석탄층의 개발 가능성을 평가하기 위해 메탄의 함유량, 흡착 상수 및 탈착 시간 등을 연구한 사례(예, Cheong *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2005; Koh *et al.*, 2008; Park, 2009)가 있지만 이산화탄소 지중 저장의 관점에서 석탄층 내 유체 유동과 저장에 대해 본격적으로 연구한 사례는 거의 없다. 특히 국내 석탄층 내 이산화탄소 지중 저장에 대한 수치 모델링 연구는 전무한 실정이다. 따라서 석탄층 내 이산화탄소 지중 저장 시 다상 유체 이동과 저장에 대한 종합적인 분석을 위한 다상 열-수리-화학적 수치 모델링 연구가 필요하며, 특히 단열의 간격이 좁은 무연탄층으로 이루어져있고 습곡 작용을 받아 지층의 경사가 심한 국내 석탄층의 특성을 고려했을 때 다상 유체 거동에 대한 단열 간격 및 지층 경사 등의 영향 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 국내 최대 탄전인 삼척탄전의 지질학적 및 수리지질학적 특성을 분석하여 그 결과를 바탕으로 석탄층 내 이산화탄소 지중 저장에 대한 일련의 열-수리-화학적 수치 모델링을 수행하였다.

본 연구의 목적은 다상 열-수리-화학적 수치 모델을 이용하여 이산화탄소 지중 저장을 위해 석탄층 내에 주입된 이산화탄소에 의한 유체(지하수, 이산화탄소, 메탄)의 거동(유동, 확산, 흡착) 및 저장 기작을 통합적으로 분석하고 이에 대한 단열 간격의 영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 다음 장에서 보듯이 석탄층 내 유체 거동 기작의 관점에서 단열의 교유투수계수 및 기질의 형태 계수 둘 다 단열 간격의 함수이다. 이는 단열 간격이 단열의 교유투수계수를 통해서 단열 내 유체 유동을 좌우하는 동시에 기질의 형태 계수를 통해서 기질 내 유체 확산 및 흡착을 좌우함을 의미한다. 이러한 이유 때문에 본 연구에서는 석탄층 내 이산화탄소 지중 저장에 대한 단열 간격의 영향을 평가하고자 한다.

2. 석탄층 내 유체 거동 기작

석탄층(coal bed)은 미세 입자로 구성된 기질(matrix)과 그 사이에 벌어진 틈인 단열(cleat)로 이루어져 있다. 기질은 내부에 존재하는 무수히 많은 미세 공극(micropore)으로 인해 높은 공극률과 낮은 교유투수계수를 가지며, 이산화탄소와 메탄과 같은 유체(fluid)의 저장소(reservoir) 역할을 한다. 반면에 단

열은 전 세계적으로 거의 모든 석탄층에서 발견되는 공통적인 지질학적 특징으로서 연장성이 양호하게 발달하는 장(또는 주)단열(face or primary cleat)과 그와 수직 방향으로 연장성이 불량하게 발달하는 단(또는 부)단열(butt or secondary cleat)로 구분된다 (Laubach *et al.*, 1998). 이러한 단열은 기질 내부의 공극에 비해 전체 석탄층에서 차지하는 작은 부피로 인해 낮은 공극률과 높은 고유투수계수를 가지며, 이산화탄소와 메탄과 같은 유체의 저장소보다는 주로 이들 유체의 이동 통로(migration pathway) 역할을 한다. 또한 단열은 일정하게 반복되어 단열군(cleat set, fracture set)을 이루며, 하나의 단열과 이웃한 두 단열 사이의 수직 거리를 단열 간격(cleat spacing), 단열 틈새의 수직 폭을 단열 간극(cleat aperture)이라고 한다.

이와 같이 서로 상이한 지질학적 및 수리지질학적 성질을 가지는 단열과 기질을 고려하기 위하여 석탄층 내 유체 유동(flow), 확산(diffusion) 및 흡착(adsorption, sorption) 등과 같은 유체 거동(behavior) 수치 모델링에서는 일반적으로 이중 공극 모델(dual porosity model)을 사용하여 개별 격자 내에서 단열(유체 유동) 및 기질(유체 확산, 유체 흡착)에 대해 별도로 연산을 수행한다(Warren and Root, 1963; Kazemi *et al.*, 1976). 그러기 위해서 이중 공극 모델에서는 단열과 기질에 대해서 다양한 관련 식이나 실험으로부터 계산되거나 측정된 서로 다른 공극률과 고유투수계수 값을 사용한다. 따라서 본 연구에서도 이러한 이중 공극 모델을 사용하였다.

2.1 단열 내 유체 유동

주입된 이산화탄소는 압력 차이에 의해 단열을 따라 유동하며 기존의 지하수와 메탄을 밀어낸다. 이 때 단열 내 유체 유동은 다음과 같이 Darcy의 법칙으로 표현된다.

$$Q_f^i = -\rho_f^i \frac{k_f k_{r,f} A_f}{\mu_f^i} \nabla (p_f^i + z \rho_f^i g) \quad (1)$$

여기에서 아래 첨자 f 는 단열, 위 첨자 i 는 구성 유체 성분, Q 는 단위 시간당 단열 내를 유동하는 유체의 질량, ρ 는 유체의 밀도, μ 는 유체의 동적 점성 계수, k 는 고유투수계수, k_r 은 상대투수계수, A 는 유체 유동 방향에 수직인 단면적, p 는 유체의 압력, z 는 수

직 방향의 좌표 위치, g 는 중력 가속도이다.

석탄층 단열 내 유체 유동을 좌우하는 공극률과 고유투수계수는 단열의 간격과 간극에 의해 결정된다. 이들의 관계는 하나의 단열군이 존재하는 경우에 대해서는 각각 식 (2) 및 식 (3)과 같으며, 삼차원적으로 동일한 성격을 가진 세 개의 단열군이 서로 직교하면서 존재하는 경우(수리지질학적 삼차원 등방성)에 대해서는 각각 식 (4) 및 식 (5)와 같다(Snow, 1968). 따라서 본 연구에서는 식 (4) 및 식 (5)를 사용한다.

$$n_f = \frac{b}{s} \quad (2)$$

$$k_f = \frac{b^2}{12} \frac{b}{s} = \frac{b^3}{12s} \quad (3)$$

$$n_f = 3 \frac{b}{s} = \frac{3b}{s} \quad (4)$$

$$k_f = 2 \frac{b^2}{12} \frac{b}{s} = \frac{b^3}{6s} \quad (5)$$

여기에서 n_f 는 단열의 공극률(porosity), k_f 는 단열의 고유투수계수(intrinsic permeability), s 는 단열의 간격(spacing), b 는 단열의 간극(aperture)이다.

한편 기질 내 유체 유동은 식 (1)과 유사한 Darcy의 법칙으로 표현되며, 기질의 공극률과 고유투수계수는 다공질 매체(porous media)에 대한 관련 식이나 실험으로부터 계산되거나 측정된 값을 사용한다.

2.2 기질 내 유체 확산

단열을 따라 유동하던 기체상의 이산화탄소는 농도 차이에 의한 확산으로 기질 내부로 이동하며, 매우 미세한 기질의 공극으로 인해 액체상의 지하수는 기질 내부로 이동하지 못한다. 이 때 농도 차이에 의한 기질 내 유체(기체) 확산은 Fick의 법칙으로 설명될 수 있으며, 확산은 기질과 단열의 접촉 면적 및 기체의 이동 거리에 영향을 받으므로 단위 부피당 이동 거리에 대한 접촉 면적의 비율을 나타내는 기질의 형태 계수(shape factor)를 고려해야 한다. 기질의 형태 계수는 단열 간격에 의해 결정되며, 하나의 단열군이 존재하는 경우에 대해서는 식 (6)과 같으며, 삼차원적으로 동일한 성격을 가진 세 개의 단열군이 서로 직교하면서 존재하는 경우(수리지질학적 삼차원 등방성)에 대해서는 식 (7)과 같다(Kazemi *et al.*, 1976). 따라서 본 연구에서는 식 (7)을 사용한다.

$$\sigma_m = \frac{4}{s^2} \quad (6)$$

$$\sigma_m = 3 \frac{4}{s^2} = \frac{12}{s^2} \quad (7)$$

여기에서 σ_m 은 기질의 형태 계수(shape factor), s 는 단열의 간격(spacing)이다.

기질 내 유체(기체) 확산은 다음과 같이 기질의 형태 계수와 Fick의 법칙으로 표현된다.

$$Q_m^i = -V_m \sigma_m D_m^i (c_j^i - c_m^i) \quad (8)$$

여기에서 아래 첨자 m 은 기질, 아래 첨자 f 는 단열, 위 첨자 i 는 구성 유체(기체) 성분, Q 는 단위 시간당 기질 내를 이동하는 유체(기체)의 질량, V 는 기질의 부피, σ 는 기질의 형태 계수, D 는 확산 계수(diffusion coefficient), c 는 유체(기체)의 농도이다. 이 때 유체(기체)의 농도는 유체(기체)의 몰분율(mole fraction) 또는 분압(partial pressure)을 의미한다.

2.3 기질 내 유체 흡착

주입된 이산화탄소가 수리동역학적 포획(hydrodynamic trapping)과 용해 포획(solubility trapping)을 거쳐 최종적으로 광물 포획(mineral trapping)에 의해 저장되는 사암층과는 달리 석탄층에 주입된 이산화탄소는 대부분 흡착 포획(adsorption trapping)에 의해 저장된다. 흡착은 반데르발스 힘(van der Waals force)에 의한 석탄층 기질 입자와 기체 입자간의 인력으로 이루어지는 물리적 결합이다. 이러한 흡착의 정도는 석탄층의 특성과 기체의 종류에 따라 다르며, 동일한 석탄층 내에서 이산화탄소가 메탄에 비해 상대적으로 높은 흡착능(adsorption capacity)을 가진다. 이는 기질 내부에서 확산으로 이동하던 이산화탄소가 경쟁적 흡착에 의해 기존에 포획되어 있던 메탄을 탈착시키고 대신 흡착될 수 있음을 의미한다.

기질 내 단일 구성 성분의 기체 흡착은 다음과 같이 단순한 Langmuir 등온흡착선(simple Langmuir isotherm)으로 표현된다(Langmuir, 1918; Law et al., 2002).

$$G = G_L \frac{p}{p + p_L} \quad (9)$$

여기에서 G 는 단위 질량의 기질에 흡착되는 기체의 부피, G_L 은 기체의 최대 흡착능(Langmuir adsorption capacity, Langmuir volume), p 는 기질 내 기체의 압력, p_L 은 기체의 최대 흡착능의 절반이 흡착될 때의 기체의 압력(Langmuir pressure)이다. 반면에 여러 구성 성분의 기체가 흡착되는 경우에 대해서는 기체의 종류에 따라 경쟁적으로 흡착이 이루어지기 때문에 기질 내 기체 흡착은 다음과 같이 확장된 Langmuir 등온흡착선(extended Langmuir isotherm)으로 표현된다(Arri et al., 1992; Hall et al., 1994; Law et al., 2002).

$$G^i = G_L^i \frac{\frac{p y^j}{p_L^i}}{1 + p \sum_{j=1}^{nc} \frac{y^j}{p_L^j}} \quad (10)$$

여기에서 위 첨자 i 는 구성 기체 성분, 위 첨자 j 는 구성 기체 성분, nc 는 구성 기체 성분의 수, G 는 단위 질량의 기질에 흡착되는 기체의 부피, G_L 은 기체의 최대 흡착능(Langmuir adsorption capacity, Langmuir volume), p 는 기질 내 기체의 압력, p_L 은 기체의 최대 흡착능의 절반이 흡착될 때의 기체의 압력(Langmuir pressure), y 는 기체의 몰분율(mole fraction)이다.

3. 한국 석탄층 특성 : 삼척탄전

석탄은 탄화 과정이 진행될수록 토탄(peat), 갈탄(brown coal, lignite), 역청탄(bituminous coal) 및 무연탄(anthracite)으로 등급이 나뉘며, 무연탄으로 갈수록 탄화 과정을 많이 받아 휘발성이 적어지고 탄소의 비율이 높아진다. 국내 석탄층은 대부분 무연탄으로 구성되어 있으며, 이산화탄소 지층 저장 대상 지층으로서 무연탄 층은 탄소의 비율이 높아 다른 등급의 석탄에 비해 흡착 저장 능력이 뛰어나다는 장점을 지니는 반면에 단열의 간극이 좁아 주입이 어렵다는 단점을 지닌다. 상기한 바와 같이 단열의 간격과 간극이 석탄층 단열의 수리지질학적 물성을 결정하는 요소라는 점을 고려했을 때에 단열의 간극이 좁아 주입에 불리한 국내 석탄층의 지층 저장 가능성을 평가하기 위해서는 단열의 간격의 영향을 연구할 필요가 있다. 단열의 간격은 석탄의 등급, 구성 성분 및 지층의 두께 등에 영향을 받으며, 석탄

Table 1. Statistics of geologic characteristics of coal beds in the Samcheok Coalfield.

Property	Minimum	Maximum	Average
Depth [m]	11.50	1,979.50	438.30
Thickness of single coal bed [m]	0.09	18.70	1.39
Thickness of total coal beds [m]	0.10	32.30	4.37
Formation dip [°]	10.0	75.0	44.0

의 등급이 갈탄에서 역청탄으로 갈수록 줄어들다가 역청탄에서 무연탄으로 갈수록 다시 증가하거나 일정하게 유지되는 경향을 보인다(Laubach *et al.*, 1998).

삼척탄전(Samcheok Coalfield)은 태백산분지에 위치한 국내 최대 탄전으로서 양덕층군과 대석회암층군으로 이루어진 조선누층군이 분포하며, 이를 석탄기의 만항층과 금천층, 폐름기의 장성층, 함백산층, 도사곡층 및 고한층, 트라이아스기의 동고층으로 구성된 평안누층군이 부정합으로 피복한다. 단층과 습곡구조는 중앙에 위치한 함백산대단층을 경계로 동부와 서부 지역이 서로 다른 방향성과 구조적 특성을 보이므로 함백산대단층을 기준으로 삼척탄전을 동부 지역과 서부 지역으로 구분한다(Seo *et al.*, 1979a, 1979b; Koh *et al.*, 2008).

본 연구에서는 삼척탄전의 시추공 자료(Korea Resources Corporation, 1990)와 보고서 자료(Cheong *et al.*, 2002)를 활용하여 석탄층의 지질학적 특성(심도, 두께, 경사)에 대한 통계 분석을 실시하였다. 분석 결과 석탄층의 심도는 평균 438.30 m, 단일 석탄층의 두께는 평균 1.39 m, 단일 시추공에 존재하는 석탄층의 두께의 합은 평균 4.37 m, 석탄층의 경사는 평균 44.0°이다(표 1). 삼척탄전의 단열 간격 및 간극에 대한 조사 자료는 존재하지 않으며, 이에 국내 전문가(Park, 2012) 자문 및 국외 문헌(Laubach *et al.*, 1998; Su *et al.*, 2001) 조사를 통해 삼척탄전 내 석탄층의 단열 간격(spacing)의 범위를 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-1}$ m로 설정하였으며, 단열 간극(aperture)을 1.0×10^{-5} m로 설정하였다.

4. 수치 모델

본 연구에 사용된 다차원 다상 열-수리-화학적 수치 모델은 CMG-GEM (Computer Modelling Group-Generalized Equation of State Model)이다. 이 수치 모델은 상태 방정식(equation of state, EOS)을

기반으로 상평형과 밀도를 예측하며, 이중 공극 모델(dual porosity model)과 다상의 유체 유동 및 혼합 기체의 확산과 흡착을 고려할 수 있다(Computer Modelling Group Ltd., 2010). Law *et al.* (2002)은 CMG-GEM을 포함한 5개의 다상 열-수리-화학적 수치 모델에 대한 비교 연구를 통해 이들 수치 모델들의 신뢰성을 확인하였으며, 수치 모델링 결과들은 서로간의 높은 상관 관계를 보여주었다. 그리고 본 연구에서는 Peng and Robinson (1976)의 상태 방정식(equation of state, EOS) 모델과 Kazemi *et al.* (1976)의 이중 공극 모델(dual porosity model)을 사용하였으며, Darcy의 법칙(식 (1)), Fick의 법칙(식 (8)) 및 확장된 Langmuir 등온흡착선(extended Langmuir isotherm) (식 (10))을 이용하여 석탄층 내 유체 유동, 확산 및 흡착을 합리적으로 고려하였다.

5. 수치 모델링 개요

상기한 삼척탄전 분석 자료를 바탕으로 수치 모델링 입력 자료로서 석탄층의 두께를 4 m, 심도를 500 m로 설정하였다. 또한 석탄층의 경사를 누출의 위험성이 없는 0°, 단열의 간극을 1.0×10^{-5} m, 단열의 간격을

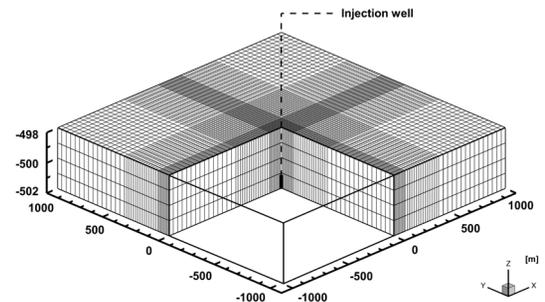


Fig. 1. Schematic diagram of the coal bed (modeling domain) and carbon dioxide injection well. the vertical axis is exaggerated 100 times.

Table 2. Initial conditions in cleat and matrix of coal bed.

Parameter	Cleat	Matrix
Water (groundwater) saturation S_w	0.999999	0.000001
Gas (CH ₄ +CO ₂) saturation S_g	0.000001	0.999999
Mole fraction y of CH ₄	0.98	0.98
Mole fraction y of CO ₂	0.02	0.02
Pressure (at 500 m depth) P [Pa]	4.91×10^6	1.26×10^6
Temperature T [°C]	30.0	30.0

합리적으로 주입이 가능한 $2.0 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^2$ m 범위로 설정하였다. 따라서 지표로부터 498~502 m 심도에 위치하는 두께가 4 m이고 가로와 세로가 각각 2,000 m인 직육면체 석탄층을 수치 모델링 영역으로 고려하였다. 수치 모델링 영역의 하부 경계면 및 상부 경계면(뿔개암)은 불투수성의 지층(예, 셰일층)으로 둘러싸여 있으며, 네 측면은 석탄층이 무한히 연장되는 것으로 가정하였다. 이산화탄소 주입정은 수치 모델링 영역의 중앙에 위치하며, 최하단의 1 m 높이 격자에서 이산화탄소를 주입하는 것으로 가정하였다. 수치 모델링 영역은 총 26,244개의 격자로 이산화되었으며, 격자의 수평 방향 길이는 주입정 주변의 10 m에서 주입정으로부터 멀어지면서 40 m까지 증가하고 수직 방향 길이는 1 m로 균일하다(그림 1).

석탄층 내 유체 포화도의 초기 조건으로서 단열은 지하수로 100%(보다 정확하게는 99.9999%의 지하수와 0.0001%의 기체로) 포화되어 있으며, 기질은 98%의 메탄과 2%의 이산화탄소로 포화되어 있는 것으로 가정하였다. 단열 내 유체 압력의 초기 조건은 1.01×10^5 Pa의 대기압과 9.81×10^3 Pa/m의 정수압 구배(hydrostatic pressure gradient)를 고려하여 선형적으로 해당 심도의 격자에 각각 부여하였으며, 지온의 초기 조건은 30.0°C로 모든 격자에 균일하게 부여하였다(표 2). 기질 내 흡착된 기체의 초기 조건은 확장된 Langmuir 흡착등온선(식 (10))에 의해 결정하였으며, 동일 심도의 단열 압력에서의 흡착 가능량의 절반에 해당하는 양의 기체가 98%의 메탄과 2%의 이산화탄소의 비율로 존재하는 것으로 가정하였다.

본 연구에서 석탄층 단열과 기질의 물성은 삼차원적으로 균질하고 등방성을 가지는 것으로 가정하였다. 그리고 단열 간격을 2.0×10^3 m (Case 1), 1.0×10^2 m (Case 2) 및 5.0×10^2 m (Case 3)로 25배

차이로 변화시키면서 석탄층 내 유체 유동, 확산 및 흡착에 대한 단열 간격의 영향을 정량적으로 평가하였다. 이 때 사용한 3개의 단열 간격 값 중에서 중간 값(Case 2)을 민감도 분석 차원에서 대표 경우(base case)로 설정하였다. 단열 간격은 1.0×10^5 m로 가정하였다. 각 경우(Case 1, Case 2, Case 3)별로 식 (4)와 식 (5) 및 식 (7)을 사용하여 각각 계산된 단열의 공극률과 고유투수계수 및 기질의 형태 계수는 표 3에 정리되어 있다. 표 3에서 보다시피 경우별로 단열의 공극률은 25배, 단열의 고유투수계수는 25배, 기질의 형태 계수는 625배 차이가 난다. 그리고 단열 내 유체의 포화도(saturation)와 상대투수계수(relative permeability) 관계는 Gash (1991)의 측정 결과에 기초하여 Law *et al.* (2002)이 제안한 표 형태의 자료를 사용하였다. 여기에서 단열 내 유체 상대투수계수에 대한 온도 및 이력 현상(hysteresis)의 효과는 고려하지 않았으며, 모세관 압력(capillary pressure)은 0으로 가정하였다. 한편 기질의 공극률과 고유투수계수 및 확산과 흡착에 대한 물성은 문헌들(Saghafi *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2007; Balan and Gumrah, 2009; Dutta *et al.*, 2011)로부터 얻어진 값들의 대표 값을 사용하였다(표 3).

이산화탄소는 1,000 ton/year (3.171×10^2 kg/sec)의 일정한 주입률(injection rate)로 10년간 총 10,000 ton이 주입되었으며, 수치 모델링 기간은 주입 기간 10년을 포함하여 100년이다.

6. 수치 모델링 결과

6.1 단열 내 유체 유동

주입된 이산화탄소는 먼저 석탄층의 단열을 통해 유동하며, 이로 인해 이산화탄소가 주입되는 수치 모델링 영역 중앙 최하부에서부터 단열 내 유체 압

Table 3. Material properties of cleat and matrix of coal bed.

Property	Cleat (Case 1, Case 2, Case 3)	Matrix (Case 1, Case 2, Case 3)
Spacing s [m]	$2.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-2}, 5.0 \times 10^{-2}$	
Aperture b [m]	1.0×10^{-5}	
Porosity n	$1.5 \times 10^{-2}, 3.0 \times 10^{-3}, 6.0 \times 10^{-4}$	4.7×10^{-2}
Intrinsic permeability k [m ²]	$8.33 \times 10^{-14}, 1.67 \times 10^{-14}, 3.33 \times 10^{-15}$	9.87×10^{-17}
Shape factor σ [1/m ²]		$3.00 \times 10^6, 1.20 \times 10^5, 4.80 \times 10^3$
Diffusion coefficient D of CH ₄ [m ² /sec]		5.72×10^{-10}
Diffusion coefficient D of CO ₂ [m ² /sec]		2.99×10^{-10}
Langmuir volume G_L of CH ₄ [m ³ /kg]		2.11×10^{-5}
Langmuir volume G_L of CO ₂ [m ³ /kg]		3.56×10^{-5}
Langmuir pressure p_L of CH ₄ [Pa]		2.56×10^6
Langmuir pressure p_L of CO ₂ [Pa]		1.77×10^6

력이 상승한다. 이산화탄소 주입 이전 주입정 최하부(이산화탄소가 주입되는 지점) 근처 단열 내 초기 유체 압력은 5.02×10^6 Pa이다. 단열 간격이 증가할수록 주입 기간 동안 주입정 최하부 근처 단열 내 유체 압력은 각각 약 5.03×10^6 Pa (Case 1), 5.10×10^6 Pa (Case 2) 및 5.37×10^6 Pa (Case 3)까지 더 크게 상승하며, 주입 종료 이후 각각 약 3년 (Case 1), 5년 (Case 2) 및 20년 (Case 3)까지 더 오래 경과한 후에 초기 유체 압력으로 회복하고 평형 상태에 도달한다. 이는 단열 간격에 따라 변하는 단열의 공극률과 고유투수계수에 기인한다. 즉 단열 간격이 증가할수록 단열의 공극률과 고유투수계수는 감소하고 이로 인해 단열 내 유체 압력은 더 빠르게 증가하며, 그 결과 단열 내 이산화탄소의 포화도와 단열의 상대투수계수는 더 빠르게 증가하기 때문이다. 이와 같이 단열 내 유체 압력 분포의 차이는 단열 내 이산화탄소, 메탄 및 지하수 유동에 영향을 끼친다. 주입된 이산화탄소는 기존에 단열 내에 존재하던 지하수 및 기질로부터 탈착되어 기질에서 단열로 확산된 메탄을 밀어내며 주입정으로부터 멀어지는 방향으로 이동한다. 단열 내 이산화탄소 및 메탄 이동은 수직적 이동과 수평적 이동으로 나누어지며, 수직적 이동은 부력과 압력 구배에 의해 이루어지는 반면에 수평적 이동은 압력 구배에 의해서만 이루어진다. 주입 초기에 이산화탄소는 부력과 압력 구배의 영향으로 주입정 근처에서 단열을 따라 상부로 이동하며, 주입 시작 이후 각각 약 6일 (Case 1), 5일 (Case

2) 및 1일 (Case 3) 후에 상부 경계면(덮개암)에 도달한다. 이는 상기한 바와 같이 단열 간격이 클수록 주입정 최하부에서의 유체 압력의 상승 폭이 커지고 이로 인해 상부와의 압력 차가 커지기 때문이다.

6.2 기질 내 유체 확산 및 흡착

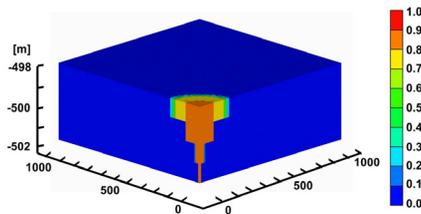
이산화탄소는 단열 내에서 지하수 및 메탄을 밀어내며 이동하는 동안에 기질 내보다 높아진 단열 내 농도(압력)로 인해 단열에서 기질로 확산한다. 그와 동시에 이산화탄소 주입 이전에 기질 내에서 높은 농도로 존재하던 메탄은 기질 내보다 낮아진 단열 내 농도로 인해 기질에서 단열로 확산한다. 기질로 확산된 이산화탄소는 메탄에 비해 상대적으로 높은 흡착능으로 인해 기존에 기질의 미세 공극에 흡착되어있던 메탄을 탈착시키고 대신에 그 자리에 흡착된다. 그리고 이산화탄소에 의해 탈착된 메탄은 단열로 확산된 후 단열을 따라 이동하다가 다시 기질로 확산 및 흡착되고 다시 기질에서 단열로 탈착 및 확산되는 과정을 반복하며 점점 주입정으로부터 멀어지는 방향으로 이동한다. 이와 같이 단열로 이산화탄소가 지속적으로 공급되는 주입 기간 동안 주입정 주변에서는 이산화탄소가 최대 흡착량까지 지속적으로 흡착되고 이로 인해 기질 내 유체 압력이 증가한다. 주입 이전 주입정 최하부(이산화탄소가 주입되는 지점) 근처 기질 내 초기 유체 압력은 1.27×10^6 Pa이다. 단열 간격이 증가할수록 주입 기간 동안 주입정 최하부 근처 기질 내 유체 압력은 각각 약

5.03×10^6 Pa (Case 1), 5.10×10^6 Pa (Case 2) 및 5.37×10^6 Pa (Case 3)까지 더 크게 상승하며, 주입 종료 이후 각각 약 3년 (Case 1), 5년 (Case 2) 및 20년 (Case 3)까지 더 오래 경과한 후에 각각 약 5.00×10^6 Pa (Case 1), 5.01×10^6 Pa (Case 2) 및 5.02×10^6 Pa (Case 3)까지 하강한다. 기질 내 유체 압력 분포는 기질 내 이산화탄소 흡착량 분포 양상(그림 4)과 흡사하지만 그보다 조금 넓게 분포한다. 이는 기질로의 이산화탄소 확산 및 흡착뿐만 아니라 상기한 바와 같이 이산화탄소에 의해 탈착된 메탄이 단열로 확산된 후 단열을 따라 유동하다가 다시 기질로 확산 및 흡착되어 기질 내 유체 압력 상승에 기여하기 때문이다.

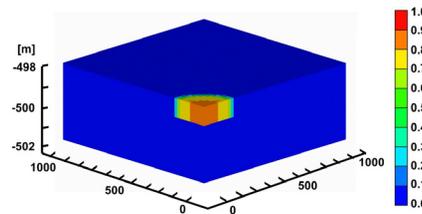
6.3 단열 내 이산화탄소 및 메탄 포화도

이산화탄소 주입 시작 10년과 100년 후의 석탄층의 단열 내 이산화탄소 포화도의 공간적 분포가 그림 2에 도시되어 있다. 주입 초기에 단열 내 이산화탄소는 부력과 압력 구배의 영향으로 주입정 최하부 근처에서 수직 방향으로 상부로 유동하며, 상부 경계면(덮개암)에 도달한 후에는 상부 경계면을 따라 수평 방향으로 넓게 퍼지면서 하부에서도 수평 방향으로 유동한다. 그 결과 단열 내 이산화탄소는 상부에서 더 넓게 분포하고 하부에서 더 좁게 분포하는 양상을 보인다. 그리고 이러한 양상은 단열 간격이 감소할수록 더 커진다. 이는 단열 간격이 작을수록

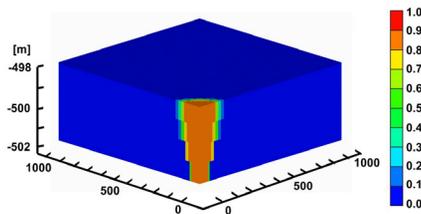
(a) Case 1 (10 years)



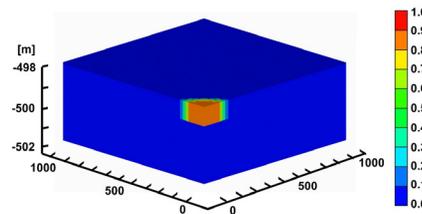
(b) Case 1 (100 years)



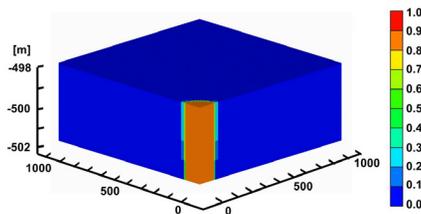
(c) Case 2 (10 years)



(d) Case 2 (100 years)



(e) Case 3 (10 years)



(f) Case 3 (100 years)

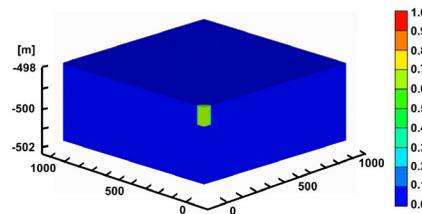
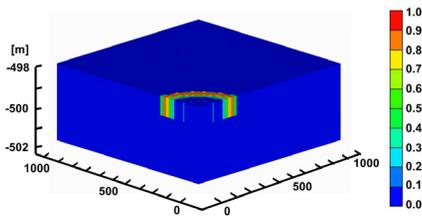


Fig. 2. Spatial distributions of saturation of carbon dioxide in cleat for (a) Case 1 after 10 years, (b) Case 1 after 100 years, (c) Case 2 (base case) after 10 years, (d) Case 2 (base case) after 100 years, (e) Case 3 after 10 years, and (f) Case 3 after 100 years since the start of carbon dioxide injection in a quarter of the modeling domain.

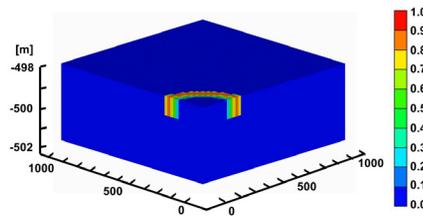
단열의 공극률과 고유투수계수가 증가하므로 더 많은 양의 이산화탄소가 수직 방향으로 유동하여 상부 경계면에 도달하여 수평 방향으로 퍼져나가면서 상부 단열 내 이산화탄소의 양이 증가하고 그만큼 하부 단열 내 이산화탄소의 양이 감소하기 때문이다. 주입 시작 10년 후에 단열 내 이산화탄소 유동의 영향 반경(이산화탄소 포화도 0.001 기준)은 상부에서 각각 265 m (Case 1), 205 m (Case 2) 및 165 m (Case 3)이며, 하부에서 각각 15 m (Case 1), 65 m (Case 2) 및 105 m (Case 3)이다. 그리고 주입 종료 후에 단열 내 유체 압력 구배가 사라지면서 단열 내 이산화탄소는 수평 방향으로 거의 유동하지 못하

고 부력에 의해 수직 방향으로만 상부로 유동하며, 그와 동시에 주입 기간 중에 기질로 확산되지 못한 일부 이산화탄소가 기질로 확산 및 흡착된다. 그 결과 주입 종료 후에 시간이 지날수록 단열 내 이산화탄소 유동의 영향 반경은 감소하며, 그 감소폭은 단열 간격이 커질수록 증가하는 양상을 보인다. 이는 단열 간격이 클수록 단열의 공극률이 작으므로 단열 내에 존재하는 이산화탄소의 양이 작기 때문이다. 주입 시작 100년 후에 단열 내 이산화탄소 유동의 영향 반경은 상부에서 각각 265 m (Case 1), 205 m (Case 2) 및 55 m (Case 3)이며, 하부에서 모든 경우에 0 m이다. 여기에서 단열 내 이산화탄소 유동의 영향 반경이 0

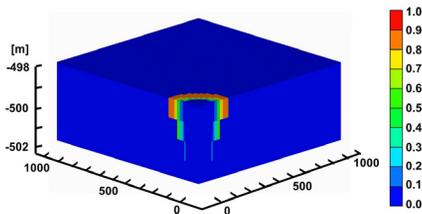
(a) Case 1 (10 years)



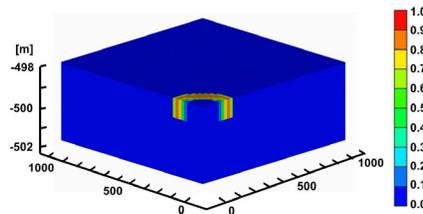
(b) Case 1 (100 years)



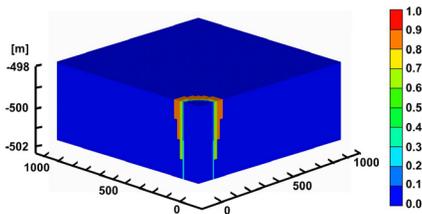
(c) Case 2 (10 years)



(d) Case 2 (100 years)



(e) Case 3 (10 years)



(f) Case 3 (100 years)

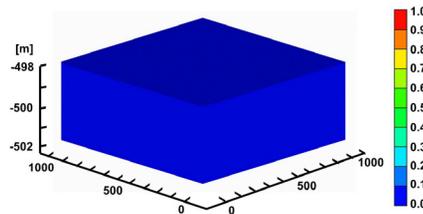


Fig. 3. Spatial distributions of saturation of methane in cleat for (a) Case 1 after 10 years, (b) Case 1 after 100 years, (c) Case 2 (base case) after 10 years, (d) Case 2 (base case) after 100 years, (e) Case 3 after 10 years, and (f) Case 3 after 100 years since the start of carbon dioxide injection in a quarter of the modeling domain.

m라는 것은 이산화탄소가 단열 내에는 존재하지 않으며, 모두 기질 내에 흡착되어 있음을 의미한다.

이산화탄소 주입 시작 10년과 100년 후의 석탄층의 단열 내 메탄 포화도의 공간적 분포가 그림 3에 도시되어 있다. 주입 초기에 기질로 확산 및 흡착된 이산화탄소에 의해 탈착된 메탄은 농도 차이에 의해 단열로 확산하고 단열 내에서 이산화탄소 유동에 의해 주입정으로부터 바깥 방향으로 유동한다. 그리고 밀려난 바깥 영역에서 농도 차이에 의해 다시 기질로 확산 및 흡착된 메탄은 뒤이어 기질로 확산 및 흡착되어 온 이산화탄소에 의해 다시 탈착 및 확산되는 과정을 반복하며 점점 더 주입정으로부터 바깥

방향으로 유동한다. 이렇게 밀려난 단열 내 메탄 포화도는 단열 내 이산화탄소 유동의 영향 반경(이산화탄소 포화도 0.001 기준)의 가장자리에서 가장 크다. 주입 시작 10년 후에 단열 내 메탄 유동의 영향 반경(메탄 포화도 0.999 기준)은 상부에서 각각 265 m (Case 1), 205 m (Case 2) 및 165 m (Case 3)이며, 하부에서 모든 경우에 0 m이다. 여기에서 단열 내 메탄 유동의 영향 반경이 0 m라는 것은 메탄이 단열 내에는 존재하지 않으며, 모두 기질 내에 흡착되어 있음을 의미한다. 그리고 주입 종료 후에 단열 내 메탄은 더 이상 바깥 방향으로 밀려나지 않으면서 부력과 압력 구배의 영향으로 수직 방향으로 상부로

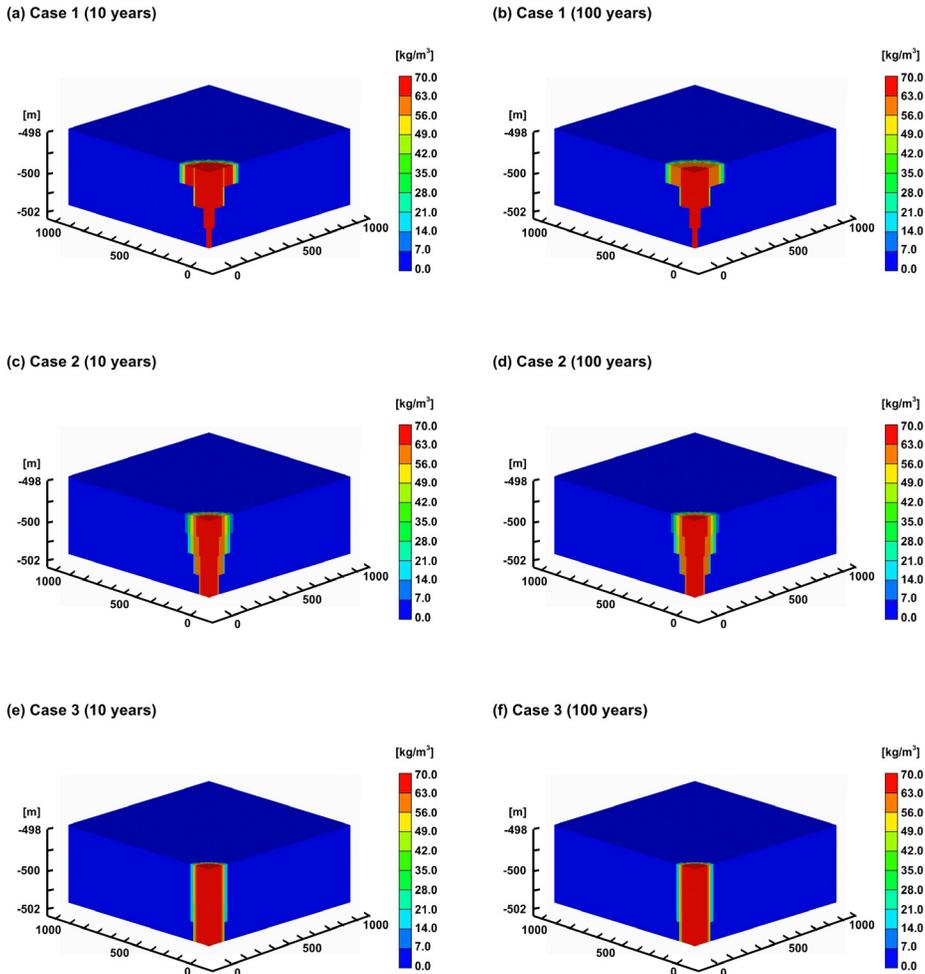


Fig. 4. Spatial distributions of adsorption of carbon dioxide in matrix for (a) Case 1 after 10 years, (b) Case 1 after 100 years, (c) Case 2 (base case) after 10 years, (d) Case 2 (base case) after 100 years, (e) Case 3 after 10 years, and (f) Case 3 after 100 years since the start of carbon dioxide injection in a quarter of the modeling domain.

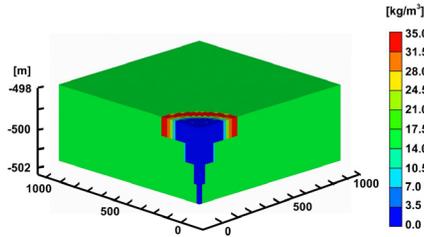
유동하며, 그와 동시에 주입 기간 중에 기질로 확산 되지 못한 일부 메탄이 기질로 확산 및 흡착된다. 그 결과 주입 종료 후에 시간이 지날수록 단열 내 메탄 유동의 영향 반경은 감소하며, 그 감소폭은 단열 간격이 클수록 증가하는 양상을 보인다. 이는 단열 간격이 클수록 단열의 공극률이 작으므로 단열 내에 존재하는 메탄의 양이 작기 때문이다. 주입 시작 100년 후에 단열 내 메탄 유동의 영향 반경은 상부에서 각각 265 m (Case 1), 205 m (Case 2) 및 0 m (Case 3)이며, 하부에서 모든 경우에 0 m이다. 여기에서 단열 내 메탄 유동의 영향 반경이 0 m라는 것은 메탄이 단열 내에는 존재하지 않으며, 모두 기질 내에 흡

착되어 있음을 의미한다.

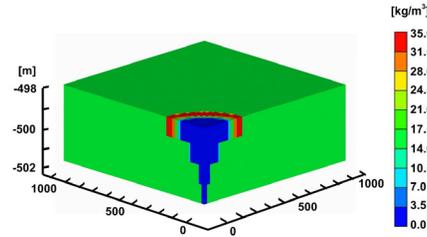
6.4 기질 내 이산화탄소 및 메탄 흡착량

이산화탄소 주입 시작 10년과 100년 후의 석탄층의 기질 내 이산화탄소 흡착량의 공간적 분포가 그림 4에 도시되어 있다. 기질 내 이산화탄소 흡착량은 주입 이전에 0.8 kg/m^3 으로 공간적으로 거의 일정하게 분포하며, 주입 시작 이후에 주입정 주변에서 약 63.7 kg/m^3 (Case 3)까지 증가한다. 한편 주입 초기에 기질 내 이산화탄소 흡착량 분포는 단열 내 이산화탄소 포화도 분포(그림 2)와 동일한 양상을 보인다. 그리고 이러한 양상은 단열 간격이 감소할수

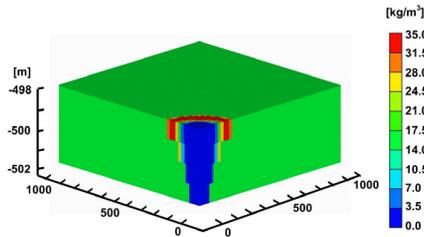
(a) Case 1 (10 years)



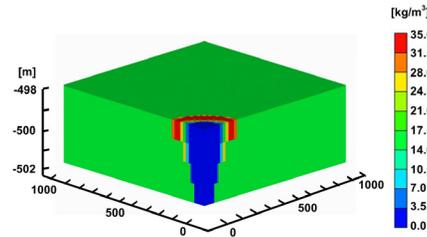
(b) Case 1 (100 years)



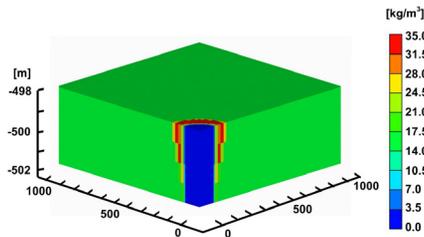
(c) Case 2 (10 years)



(d) Case 2 (100 years)



(e) Case 3 (10 years)



(f) Case 3 (100 years)

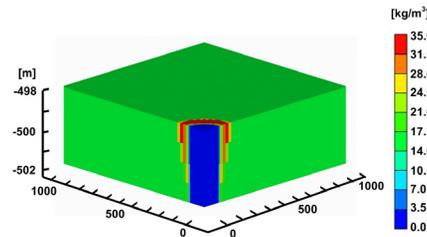


Fig. 5. Spatial distributions of adsorption of methane in matrix for (a) Case 1 after 10 years, (b) Case 1 after 100 years, (c) Case 2 (base case) after 10 years, (d) Case 2 (base case) after 100 years, (e) Case 3 after 10 years, and (f) Case 3 after 100 years since the start of carbon dioxide injection in a quarter of the modeling domain.

록 더 커진다. 이는 단열 간격이 작을수록 단열의 공극률과 고유투수계수가 증가하므로 더 많은 양의 이산화탄소가 수직 방향으로 유동하여 상부 경계면에 도달하여 수평 방향으로 퍼져나가면서 상부 기질 내 흡착된 이산화탄소의 양이 증가하고 그만큼 하부 기질 내 흡착된 이산화탄소의 양이 감소하기 때문이다. 주입 시작 10년 후에 기질 내 이산화탄소 흡착의 영향 반경(이산화탄소 흡착량 0.8 kg/m^3 기준)은 상부에서 각각 285 m (Case 1), 225 m (Case 2) 및 185 m (Case 3)이며, 하부에서 각각 25 m (Case 1), 75 m (Case 2) 및 125 m (Case 3)이다. 그리고 상기한 바와 같이 주입 종료 후에도 단열 내 이산화탄소는 상부로 유동하며, 그와 동시에 주입 기간 중에 기질로 확산되지 못한 일부 이산화탄소가 기질로 확산 및 흡착되지만 메탄이 있어도 일단 기질에 흡착된 이산화탄소는 다시 탈착 및 유동하지 못한다. 이는 석탄층의 기질 내 흡착 포획(adsorption trapping)에 의한 이산화탄소 지중 저장의 높은 안정성을 보여준다. 그 결과 주입 종료 후에 시간이 지나도 기질 내 이산화탄소 흡착의 영향 반경은 감소하지 않는 양상을 보인다. 주입 시작 100년 후의 기질 내 이산화탄소 흡착의 영향 반경은 10년 후의 기질 내 이산화탄소 흡착의 영향 반경과 동일하다.

이산화탄소 주입 시작 10년과 100년 후의 석탄층의 기질 내 메탄 흡착량의 공간적 분포가 그림 5에 도시되어 있다. 기질 내 메탄 흡착량은 주입 이전에 16.5 kg/m^3 으로 공간적으로 거의 일정하게 분포하며, 주입 시작 이후에 주입정 주변에서 약 33.1 kg/m^3 (Case 3)까지 증가한다. 한편 주입 초기에 기질 내 메탄 흡착량 분포는 단열 내 메탄 포화도 분포(그림 3)와 동일한 양상을 보인다. 주입 시작 10년 후에 기질 내 메탄 흡착의 영향 반경(메탄 흡착량 16.5 kg/m^3 기준)은 상부에서 각각 285 m (Case 1), 225 m (Case 2) 및 185 m (Case 3)이며, 하부에서 각각 25 m (Case 1), 75 m (Case 2) 및 125 m (Case 3)이다. 그리고 상기한 바와 같이 주입 종료 후에도 단열 내 메탄은 더 이상 바깥 방향으로 밀려나지 않으면서 상부로 유동하며, 그와 동시에 주입 기간 중에 기질로 확산되지 못한 일부 메탄이 기질로 확산 및 흡착되지만 이산화탄소 없이는 일단 기질에 흡착된 메탄은 다시 탈착 및 유동하지 못한다. 그 결과 주입 종료 후에 시간이 지나도 기질 내 메탄 흡착의 영향

반경은 감소하지 않는 양상을 보인다. 주입 시작 100년 후의 기질 내 메탄 흡착의 영향 반경은 10년 후의 기질 내 메탄 흡착의 영향 반경과 동일하다.

6.5 이산화탄소 흡착 포획 효율

이산화탄소 주입 시작 이후 이산화탄소 누적 주입량 및 흡착량의 시간적 변화가 그림 6에 도시되어 있다. 주입 기간 동안 기질 내 이산화탄소 누적 흡착량은 각각 약 8,836 ton (Case 1), 8,888 ton (Case 2) 및 8,974 ton (Case 3)으로 단열 간격이 커질수록 증가하지만 큰 차이를 보이지 않는다. 그리고 주입 종료 이후 기질 내 이산화탄소 누적 흡착량은 각각 약 8,876 ton (Case 1), 8,972 ton (Case 2) 및 약 9,050 ton (Case 3)으로 주입 기간 동안 기질에 흡착되지 못한 이산화탄소 중 일부가 주입 종료 이후 흡착되었으나 그 양은 주입 기간 중 누적 흡착량에 비해 매우 적다. 식 (7)과 표 3에서 보다시피 단열 간격을 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ (Case 1), $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ (Case 2) 및 $5.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ (Case 3)로 25배 차이로 변화시키면 기질 내 유체 확산 및 흡착을 좌우하는 기질의 형태 계수는 625배 차이가 난다. 그럼에도 불구하고 단열 간격의 함수인 기질의 형태 계수에 상관없이 주입 종료 직후에 최종적으로 모든 경우에서 주입된 이산화탄소의 88.7% 이상이 기질에 흡착 저장되며, 이는 석탄층의 이산화탄소 지중 저장 효율이 매우 높음을 보여준다. 이는 모든 경우에서 단열 내 이산화탄소가 유동과 거의 동시에 기질로 확산되기에 충분한

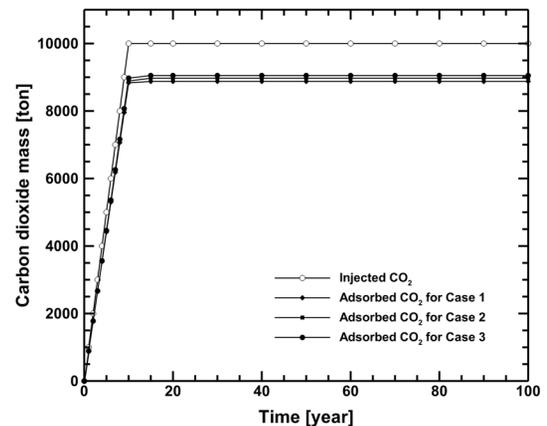


Fig. 6. Temporal change of cumulative adsorption of carbon dioxide in matrix for Cases 1, 2, and 3 since the start of carbon dioxide injection.

확산 속도를 가지기 때문이다. 이와 같이 석탄층 내 주입된 이산화탄소는 단열 내 유동과 거의 동시에 기질로의 확산을 통해 기질에 흡착되어 단시간 내에 안정적으로 저장된다. 이는 광물 포획(mineral trapping)을 통해 안정적으로 저장되기까지 오랜 기간이 걸리는 사암층에 비해 흡착 포획(adsorption trapping)을 통해 안정적으로 저장되기까지 짧은 기간이 걸리는 석탄층이 지중 저장 대상 지층으로서 가지는 장점이다.

7. 결 론

석탄층 내에 주입된 이산화탄소에 의한 유체(지하수, 이산화탄소, 메탄)의 거동(유동, 확산, 흡착) 및 저장 기작을 통합적으로 분석하고 이에 대한 단열 간격의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 다상 열-수리-화학적 수치 모델을 이용한 일련의 수치 모델링을 서로 다른 세 가지 값의 단열 간격에 대해서 수행하였다. 또한 수치 모델링에 한국 석탄층의 특성을 반영하기 위하여 삼척탄전 자료를 분석하여 사용하였다. 수치 모델링 결과는 단열 간격이 이산화탄소 및 메탄의 단열 내 유동, 기질 내 확산 및 기질 내 흡착에 중요한 영향을 미침을 보여준다. 그 결과 단열 간격의 변화에 따라서 이산화탄소 주입에 의한 석탄층 메탄 회수 증진 및 이산화탄소 흡착 포획의 시공간적 양상이 다르게 나타난다. 이는 단열 간격이 증가할수록 단열의 공극률과 고유투수계수 및 기질의 형태 계수가 감소하기 때문이다. 한편 단열 간격에 상관없이 주입 종료 직후에 주입된 이산화탄소의 대부분이 기질에 흡착 저장되며, 이는 석탄층의 이산화탄소 지중 저장 효율이 매우 높음을 보여준다. 이는 모든 경우에서 단열 내 이산화탄소가 유동과 거의 동시에 기질로 확산되기에 충분한 확산 속도를 가지기 때문이다. 이와 같이 석탄층 내 주입된 이산화탄소는 단열 내 유동과 거의 동시에 기질로의 확산을 통해 기질에 흡착되어 단시간 내에 안정적으로 저장된다. 이는 광물 포획을 통해 안정적으로 저장되기까지 오랜 기간이 걸리는 사암층에 비해 흡착 포획을 통해 안정적으로 저장되기까지 짧은 기간이 걸리는 석탄층이 지중 저장 대상 지층으로서 가지는 장점이다. 이와 같이 본 연구를 통해서 제시된 다상 열-수리-화학적 수치 모델링 기술과 그 적용 결과들은 향후 석탄층 내 이산화탄소 지중 저장의 성능 및 효율을 정량적으로 평가하고 최적화하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 산하 한국연구재단의 Korea CCS 2020 사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 부분적으로 미래창조과학부 산하 한국연구재단의 Brain Korea 21 사업 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 편집위원을 맡아주신 채병곤 박사님 그리고 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 왕수균 교수님과 정훈영 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Arri, L.E., Yee, D., Morgan, W.D. and Jeansonne, M.W., 1992, Modeling coalbed methane production with binary gas sorption. Proceedings of the Society of Petroleum Engineers Rocky Mountain Regional Meeting, Casper, Wyoming, May 18-21, 459-472.
- Balan, H.O. and Gumrah, F., 2009, Assessment of shrinkage-swelling influences in coal seams using rank-dependent physical coal properties. *International Journal of Coal Geology*, 77, 203-313.
- Busch, A. and Gensterblum, Y., 2011, CBM and CO₂-ECBM related sorption processes in coal: A review. *International Journal of Coal Geology*, 87, 49-71.
- Cheong, T.J., *et al.*, 2002, Preliminary study for the development of coal bed methane. Technical Report KR-02(T)-01, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Korea, 162 p (in Korean with English summary).
- Computer Modelling Group Ltd., 2010, GEM user's guide, version 2010: Advanced compositional and GHG reservoir simulator. Technical Report, Computer Modelling Group (CMG) Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 1180 p.
- Dutta, P., Bhowmik, S. and Das, S., 2011, Methane and carbon dioxide sorption on a set of coals from India. *International Journal of Coal Geology*, 85, 289-299.
- Gash, B.W., 1991, Measurement of rock properties in coal for coalbed methane production. Proceedings of the Sixty-Sixth Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 6-9, SPE-22909, 221-230.
- Gentzis, T. and Bolen, D., 2008, The use of numerical simulation in predicting coalbed methane producibility from the Gates coals, Alberta Inner Foothills, Canada: Comparison with Mannville coal CBM production in the Alberta Syncline. *International Journal of Coal Geology*, 74, 215-236.
- Hall, F.E., Zhou, C., Gasem, K.A.M., Robinson, Jr., R.L.

- and Yee, D., 1994, Adsorption of pure methane, nitrogen, and carbon dioxide and their binary mixtures on Wet Fruitland Coal. Proceedings of the Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Conference and Exhibition, Charleston, West Virginia, November 8-10, 329-344.
- Kazemi, H., Merrill, Jr., L.S., Porterfield, K.L. and Zeman, P.R., 1976, Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs. Proceedings of the Fourth SPE-AIME Symposium on Numerical Simulation of Reservoir Performance, Los Angeles, California, February 19-20, Society of Petroleum Engineers Journal, 16, 317-326.
- Koh, H.J., *et al.*, 2008, Exploration of coalbed methane. Technical Report 2005-R-ER02-P01-0-000, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Korea, 363 p (in Korean with English summary).
- Korea Resources Corporation (KRC), 1990, Report for coal field geology and drilling investigation. Technical Report 14, Korea Resources Corporation, Korea, 323 p (in Korean).
- Langmuir, I., 1918, The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society, 40, 1361-1403.
- Laubach, S.E., Marrett, R.A., Olson, J.E. and Scott, A.R., 1998, Characteristics and origins of coal cleat: A review. International Journal of Coal Geology, 35, 175-207.
- Law, D.H.S., van der Meer, L.G.H. and Gunter, W.D., 2002, Numerical simulator comparison study for enhanced coalbed methane recovery processes, Part I: Pure carbon dioxide injection. Proceedings of the Society of Petroleum Engineers Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, April 30-May 2, SPE-75669, 1-14.
- Metz, B., Davison, O., de Coninck, H.C., Loos, M. and Mayer, L.A. (eds.), 2005, Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 431 p.
- Park, S.W., 2009, Preliminary assessment of methane storage capacity of coalseams from Dogye area of the Samcheok Coalfield. Journal of the Geological Society of Korea, 45, 249-259 (in Korean with English abstract).
- Park, S.W., 2012, Personal communications and data.
- Park, S.W., *et al.*, 2005, Planning research project on coal bed methane (CBM) potential for Korean anthracite and possibility of its utilization. Technical Report 2004-R-RD04-P-01, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Korea, 195 p (in Korean).
- Peng, D.Y. and Robinson, D.B., 1976, A new-two constant equation of state. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 15, 59-64.
- Ross, H.E., Hagin, P. and Zoback, M.D., 2009, CO₂ storage and enhanced coalbed methane recovery: Reservoir characterization and fluid flow simulations of the Big George coal, Powder River Basin, Wyoming, USA. International Journal of Greenhouse Gas Control, 3, 773-786.
- Saghafi, A., Faiz, M. and Roberts, D., 2007, CO₂ storage and gas diffusivity properties of coals from Sydney Basin, Australia. International Journal of Coal Geology, 70, 240-254.
- Seo, H.G., *et al.*, 1979a, Geology of the Samcheok coalfield. Technical Report, Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Korea, 50 p (in Korean with English abstract).
- Seo, H.G., *et al.*, 1979b, Geologic atlas of the Samcheok coalfield (1:25,000). Technical Report, Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Korea, 22 p (in Korean with English abstract).
- Snow, D.T., 1968, Rock fracture spacings, openings, openings and porosities. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 94, 73-91.
- Su, X., Feng, Y., Chen, J. and Pan, J., 2001, The characteristics and origins of cleat in coal from Western North China. International Journal of Coal Geology, 47, 51-62.
- Warren, J.E. and Root, P.J., 1963, The behavior of naturally fractured reservoirs. Society of Petroleum Engineers Journal, 3, 245-255.
- Wei, X., Massarotto, P., Wang, G., Rudolph, V. and Golding, S.D., 2010, CO₂ sequestration in coals and enhanced coalbed methane recovery: New numerical approach. Fuel, 89, 1110-1118.
- Weniger, P., Francu, J., Hemza, P. and Krooss, B.M., 2012, Investigations on the methane and carbon dioxide sorption capacity of coals from the SW Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic. International Journal of Coal Geology, 93, 23-39.
- Wong, S., Law, D., Deng, X., Robinson, J., Kadatz, B., Gunter, W.D., Jianping, Y., Sanli, F. and Zhiqiang, F., 2007, Enhanced coalbed methane and CO₂ storage in anthracitic coals - Micro-pilot test at South Qinshui, Shanxi, China. International Journal of Greenhouse Gas Control, 1, 215-222.
- Zarrouk, S.J. and Moore, T.A., 2009, Preliminary reservoir model of enhanced coalbed methane (ECBM) in a sub-bituminous coal seam, Huntly Coalfield, New Zealand. International Journal of Coal Geology, 77, 153-161.

투 고 일 : 2014년 10월 21일

심 사 일 : 2014년 10월 23일

심사완료일 : 2014년 11월 24일