

호주 오토웨이 프로젝트 CO₂ 주입 대상 염수층의 지질 모델링 및 CO₂ 거동 시뮬레이션

신영재[‡] · 박찬희 · 허대기 · 신중호
한국지질자원연구원

요 약

본 연구는 호주 오토웨이 프로젝트의 이산화탄소 주입 대상 지층인 Paaratte 층의 삼각주 사암 염수층 내 퇴적상의 분포 예측과 이산화탄소 거동 예측 시뮬레이션에 중점을 두고 있다. 물리검층 및 시추코어 자료를 이용하여 Paaratte 층에서 다섯 개의 퇴적상을 구분하였다. 주입 대상 지층의 3차원 격자에서 퇴적상 분포를 예측하기 위해 각 퇴적상의 횡적 연장성, 수직 상관성, 방향성을 분석하여 입력자료로 활용하였고, 추계론적 방법을 이용하여 퇴적상 모델링을 수행하였다. 코어 분석과 물리검층 분석 결과는 공극률이 각 퇴적상에 따라 분포 범위가 상이하고, 투과도와 높은 상관관계가 있음을 보여준다. 이러한 분석 결과를 고려하여, 각 퇴적상별로 공극률 분포를 추계론적 방법으로 예측하였고, 공극률 모델을 이용하여 투과도의 분포를 예측하였다. 퇴적상 분포를 반영한 공극률 모델링 결과는 사암이 우세한 퇴적상 분포 영역에서 공극률이 높고, 이암이 우세한 영역에서 공극률이 낮은 특성을 반영함으로써 대상 지층의 비균질성을 잘 표현하는 것으로 여겨진다. 다섯 개의 퇴적상으로 구성된 비균질한 염수층과 저류암-비저류암으로 구성된 균질한 염수층을 대상으로 각각 이산화탄소 거동 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 퇴적상의 비균질한 분포 특성이 불연속적으로 확산되는 플룸의 형태, 이산화탄소 유동 방향, 이산화탄소 포화도 등에 영향을 줄 수 있는 요인임을 보여준다.

주요어: 오토웨이 프로젝트, 이산화탄소 지중저장, 염수층, 지질 모델링, 이산화탄소 거동 시뮬레이션

Young Jae Shinn, Chan-Hee Park, Dae Gee Huh and Joong-Ho Synn, 2014, Geological modeling and simulations of CO₂ plume behavior in a saline formation, CO2CRC Otway Project, Australia. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 50, no. 3, p. 387-400

ABSTRACT: This study focuses on the prediction of facies distribution and on the simulation of CO₂ plume behavior in saline sandstones of deltaic origin, Paaratte Formation, Otway Basin where CO2CRC Otway Project considers CO₂ injection. Five facies are identified for the Paaratte Formation, based on well log and core data. Facies are populated in a 3-dimensional grid by using stochastic method with consideration of lateral continuity, vertical range and orientation for each facies. Well log and core analysis show that porosity is different for each facies and is closely related to permeability. Considering this relationship, porosity is modeled stochastically for each facies and then the porosity model is used to guide the distribution of permeability. The benefit of constraining the porosity model to the facies model is to obtain geological heterogeneity with high porosities distributed within sand-dominated facies, and low porosities within mud-dominated facies. The simulation study has been performed to evaluate the behavior of CO₂ plumes for two end-member reservoirs: heterogeneous with five facies and homogeneous with reservoir and non-reservoir facies. The simulation results imply that different reservoirs can have a different impact on the CO₂ behavior such as saturation, flow direction, and shape of discrete CO₂ plumes.

Key words: Otway Project, geological storage of CO₂, saline formation, geological modeling, simulation of CO₂ plume behavior

(Young Jae Shinn, Chan-Hee Park, Dae Gee Huh and Joong-Ho Synn, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-42-868-3251, E-mail: shinn21@kigam.re.kr

1. 서론

호주 오프웨이(Otway) CCS 실증 프로젝트는 고갈가스전(depleted gas field)의 저류층에 대한 이산화탄소 주입과 실증을 완료하였고, 2단계에서 염수층(saline formation)을 대상으로 이산화탄소 주입 및 관련 연구개발을 진행하고 있다(Jenkins *et al.*, 2008; Bunch, 2013). 고갈가스전은 천연 가스를 저장할 만큼 안정적인 지질조건을 갖추고 있음이 검증된 반면 염수층은 구조적 밀폐가 완전하지 않고, 저류층 및 덮개층의 지질학적 불확실성이 상대적으로 높다. 그럼에도 불구하고, 염수층에 주입된 이산화탄소는 잔류 포획, 광물 포획 등의 기작에 의해 장기간 저장이 가능하고 덮개능력이 충분하다면 넓은 지역에 이산화탄소 플룸(plume)이 형성되기 때문에 상업적 규모의 대용량 이산화탄소 지중저장에 적합할 것이다(Michael *et al.*, 2010). 염수층 저장의 경우 주입된 이산화탄소의 거동을 이해하고 저장-덮개 시스템의 화학적 및 물리적 변화를 장기적으로 예측하는 것이 중요하다. 특히, 이산화탄소의 흐름을 방해하고, 지화학적 변화에 민감한 이암과 속성작용에 의해 형성된 교질물의 지질학적 특성 및 분포를 이해하는 것이 중요하다(Daniel *et al.*, 2011; Bunch *et al.*, 2012). 주입 및 저장이 용이한 암상과 이산화탄소의 흐름을 방해하는 암상을 구분하고 이들의 연속성 및 분포를 예측하는 것은 이산화탄소 거동에 영향을 미치는 물성의 비균질성을 이해하는데 필요한 기본적인 정보를 제공한다. 주입 대상 지층에서 비균질한 암상의 공간적 분포는 지질학적 특성을 반영한 지구통계적 기법을 적용하여 예측이 가능하다. 예측된 암상 및 물성 분포는 이산화탄소 거동예측, 주입성능 평가, 누출 위험도 평가를 위한 동적 모델링의 기초 자료로 활용된다.

이번 연구에서는 호주 오프웨이 분지 실증 사이트에서 획득한 시추코어, 물리검층, 탄성과 자료를 통합 해석하여 주입 대상 염수층의 퇴적상, 공극률, 투과도 분포 예측 모델링을 수행하고, 이를 기반으로 주입 이산화탄소의 거동 시뮬레이션을 수행하였다. 염수층 내에 분포하는 퇴적상에 따라 공극률과 투과도의 분포가 달라지고, 이산화탄소 거동 시뮬레이션에서도 예측된 퇴적상 분포를 기반으로 다양한 물성의 변화들을 계산하기 때문에 염수층의 퇴적상

분포 예측이 중요하다. 따라서 연구지역의 시추코어와 물리검층 자료를 이용하여 주입 지층에 대한 퇴적학적 해석, 지구통계 기반의 자료 분석을 수행하여 퇴적상 분포를 예측하였다.

저류층을 구성하는 암상을 저류암과 비저류암으로 단순화하는 것은 유체의 흐름을 저류공학적으로 이해하는데 유용하며 오일이 유동성을 가지고 생산정까지 장애물 없이 연속적으로 흘러서 생산이 가능한 지를 판단하는데 실용적이다. 그러나, 이산화탄소 지중저장의 경우 주입된 이산화탄소의 유동을 장기적으로 예측해야 하고 누출 위험도에 대한 예측이 중요하기 때문에 저류층 내의 비균질성이 이산화탄소의 주입, 포획, 유동에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 평가하는 것이 필요하다(Flett *et al.*, 2007; Doughty, 2010; Lengler *et al.*, 2010). 이번 연구에서는 대상 지층의 비균질성이 이산화탄소 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 다섯 개의 퇴적상으로 구성된 비균질한 염수층과 저류암과 비저류암으로 단순화한 염수층에 대해 각각 시뮬레이션을 수행하고 결과를 비교 검토 하였다. 연구지역의 3개 시추공으로 저장층의 비균질성을 예측하기에는 한계가 있기 때문에 시뮬레이션 결과는 이산화탄소의 거동을 상세하게 예측한다기보다 저장층의 균질한 정도에 따라 이산화탄소 거동 양상이 어떻게 달라지는지를 보여주는 데 의의가 있다.

2. 연구 지역

오프웨이 분지(Otway Basin)는 동호주의 남쪽 해안을 따라 동-서 방향으로 발달하는 중생대-신생

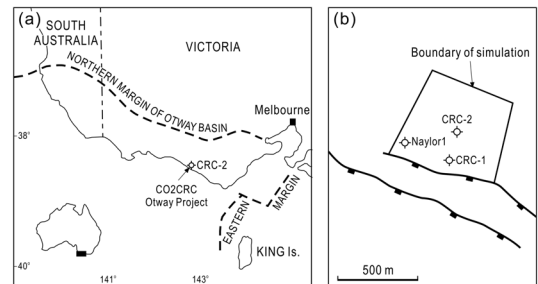


Fig. 1. (a) Location of the Otway Basin and injection site of CO2CRC Otway Project (modified from Middleton and Falvey, 1983). (b) Area of static geological model and flow simulation, including three wells.

대 퇴적분지이다(그림 1a). 오토웨이 분지는 북쪽으로 육상에 드러난 고생대 기반암과 접하고, 남쪽으로는 해상으로 연장된다. 오토웨이 분지는 대륙지각의 열개(continental rift)와 분열(breakup)이 일어나 형성되기 시작하였고, 호주지각이 남극으로부터 떨어져 북쪽으로 표이하면서 전기 백악기에는 주로 육성 퇴적층, 후기 백악기에는 두꺼운 삼각주 퇴적층, 신생대에는 해성 퇴적층이 차례대로 형성되었다(Hill *et al.*, 1994; Finlayson *et al.*, 1996).

오토웨이 프로젝트에서 주입 대상 구간은 후기 백악기 Sherbrook Group의 Paaratte 층이다(그림 2). Sherbrook Group은 해침과 해퇴가 주기적으로 반복되면서 형성된 삼각주 및 천해환경에서 퇴적된 사암과 이암들로 주로 구성된다. Paaratte 층은 투과도가 양호한 사암과 석회질 이암의 교호층이며, 속성작용에 의한 탄산염 교질물이 협재하는 것이 특징이다(Geary and Reid, 1998). 사암의 두께는 매우 다양하며, 일반적으로 Paaratte 층 하부구간에서 4~12 m, 상부구간에서 25~35 m 정도로 나타난다. 퇴적환경은 해안선이 바다쪽으로 이동하며 형성된 천해 또는 삼각주 평원 환경으로 해석되었다(Coleman and Prior, 1982). 미화석을 이용한 퇴적환경 연구에

서 Paaratte 층의 하부는 연근해의 이암이 우세하고 상부로 가면서 하호성이 우세한 삼각주 평원이 발달한다(Gallagher *et al.*, 2005). 연구지역의 시추코어에서 인지되는 Paaratte 층은 하부에 전삼각주(prodelta)에서 퇴적된 이암이 우세하고, 상부로 가면서 삼각주 사주(mouth bar), 하천의 영향이 있는 염하구 환경의 조습지(tidal flat) 이암과 하도 사암이 나타난다(Daniel *et al.*, 2011; Lawrence *et al.*, 2011).

오토웨이 프로젝트의 주관기관인 CO₂CRC는 CRC-2 공을 이용하여 염수층에 이산화탄소를 주입할 계획이다. 이번 연구에서 정적 및 동적 모델링을 위한 영역은 약 560 m × 580 m 이며, CRC-2, CRC-1, Naylor-1 공을 포함한다(그림 1b). 영역의 남쪽 경계는 북서-남동 방향의 단층선으로 정의되며, 나머지 경계는 임의의 경계선으로 이루어진다. 주입공인 CRC-2 공에서 모델 영역의 경계까지 거리는 약 250 m 정도이다. 탄성과 모델링에 의하면(Pevzner *et al.*, 2013) 30,000 톤의 이산화탄소를 주입할 경우 2 m 이상 두꺼운 이산화탄소 플룸은 CRC-2 공으로부터 약 200 m 내외에 분포하는 것으로 예측되었기 때문에 본 연구의 모델 영역에서 경계조건의 영향은 미비할 것이다.

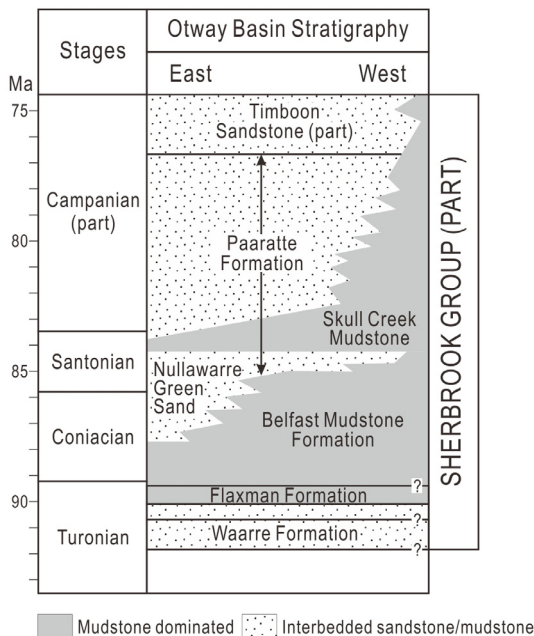


Fig. 2. The Upper Cretaceous stratigraphy of the Otway Basin (after Gallagher *et al.*, 2005).

3. 연구자료 및 방법

본 연구에서 활용한 탄성과 탐사 자료, 물리검층 자료, 시추코어 공극률과 투과도 자료는 호주 CO₂CRC가 제공하였다. 지질 모델링은 슈림버저(Schlumberger)의 페트렐(PETREL) 소프트웨어를 이용하였다. 지질 모델링 과정은 층서-구조 모델링, 암상 분포 모델링, 물성 분포 모델링으로 구성된다(그림 3). 층서-구조 모델링은 탄성과 및 물리검층 자료로부터 해석된 지층과 단층을 입력하여 모델 영역의 기하학적 형태를 구성하는 과정이다. 지층과 단층으로 구성된 지질구조는 x, y, z 축 방향으로 적절한 크기를 가지는 3차원 단위격자로 구성된다. 암상 분포 모델링은 시추코어 관찰에서 구분한 퇴적상을 업스케일(upscale)하여 3차원 지질격자에 할당한 후 시추공 사이의 공간에서 암상의 분포를 예측하는 과정이다. 이번 연구에서는 세 개의 시추코어에서 관찰한 퇴적상을 이용하였고, 암상 분포 예측을 위해 크리깅과 순차지표시뮬레이션 지구통계 기법을 이용하였다. 물성 모

Table 1. Porosity and permeability measured in major facies of Paaratte Formation. The low or high value of the porosity equal the mean value minus or plus standard deviation of the porosity. The values of the permeability are determined using a regression line obtained from porosity-permeability plot for each facies.

Facies		Porosity			Permeability (mD)		
Code	Description	Low	Mean	High	Low	Mean	High
0	Distal mouth bar	0.16	0.22	0.28	0.38	7.95	167.74
1	Proximal mouth bar	0.22	0.27	0.31	18.82	173.23	1594.99
2	Distributary channel	0.26	0.28	0.30	1996.00	2486.32	3097.09
3	Cement section	0.05	0.14	0.23	0.03	0.71	18.16
4	Delta front	-	0.15	-	-	0.10	-

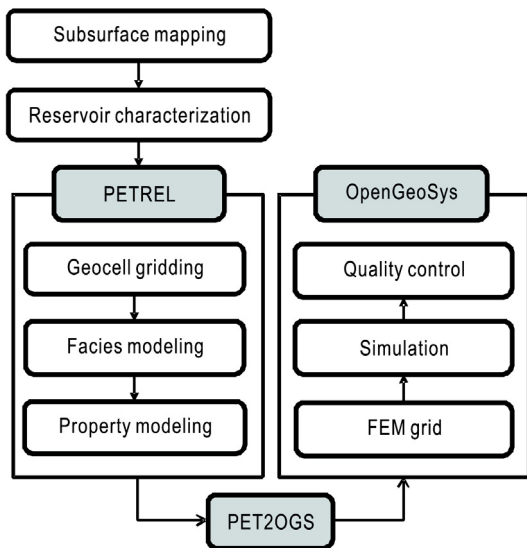


Fig. 3. General workflow for static geological modeling and flow simulation.

델링은 시추 위치에서 계산한 공극률, 수포화도, 투과도 등과 같은 물성 값을 업스케일하여 3차원 지질 격자에 값을 할당한 후 시추공 사이의 공간에서 물성 값의 분포를 예측하는 과정이다. 공극률 값의 범위는 암상에 따라 상이하기 때문에 예측된 암상 분포 결과를 기반으로 공극률 분포 예측 모델링을 수행하였다. 투과도의 분포는 암상 및 공극률의 분포와 상관성이 높기 때문에 예측된 공극률 분포 결과를 기반으로 투과도 분포를 예측하였다. 공극률과 투과도 분포 예측을 위해 순차가우시안시물레이션 기법을 이용하였다.

이산화탄소 거동 시물레이션은 소스코드가 공개되어 있는 독일의 Helmholtz Centre에서 개발한

OpenGeoSys 프로그램을 이용하였다. OpenGeoSys는 지층에서 복합적이고 유기적으로 일어나는 열적, 동력학적, 기계적, 화학적 현상들을 시물레이션하는 공개된 과학 모델 중의 하나이며, 이미 범유럽 이산화탄소 포집 및 저장 프로젝트인 CO2-MoPa, CO2-CLEAN 등에서 사용되어 검증된 프로그램이다.

페트렐을 이용하여 생성한 3차원 지질구조의 단위 격자는 6개의 면을 가지는 직육면체의 corner-point 격자이다. Corner-point 격자는 슈림버저에서 공급하는 저류층 시물레이션 소프트웨어인 이클립스(Eclipse)에서 사용하는 시물레이션 격자로 유한차분법(finite difference method)을 바탕으로 이용된다. 이번 연구에서 사용한 OpenGeoSys는 유한요소법(finite element method)을 이용하는 모델이기 때문에 PET2OGS 알고리즘을 이용하여 페트렐에서 생성한 Corner-point 격자를 OpenGeoSys의 유한요소법에서 사용할 수 있는 데이터베이스로 변환하여 사용하였다(Park *et al.*, 2014).

4. 지질 모델링

4.1 저류층 특성

주입 지역에서 Paaratte 층은 Skull Creek Mudstone 층을 덮고 있는 삼각주 환경의 퇴적체이다(그림 2, 4). 감마선 검층과 시추코어 주상도에서 삼각주 퇴적체는 최하부에서 상부로 가면서 전반적으로 상향 조립화하는 것이 관찰된다. 이는 광역적으로 분포하는 이암층 위에 해안선이 바다쪽으로 이동하며 전진하는 삼각주(prograding delta) 환경의 발달을 지시한다.

CRC-2 공의 주입 대상 지층에서 Paaratte 층은

크게 5 개의 퇴적상으로 구성된다(그림 4). Paaratte 층의 하부는 삼각주전면(delta front), 말단사주(distal mouth bar) 환경에서 퇴적된 이질암이 우세하고, 상부로 가면서 근위사주(proximal mouth bar), 분류하도(distributary channel) 환경에서 퇴적된 사질암이 우세하게 발달한다(그림 4). 주입 대상 지층은 상부에 말단사주 환경에서 퇴적된 이암층에 의해 피복된다(그림 4). 이는 퇴적 중심이 다른 곳으로 이동하였거나, 갑작스런 구조적 침강에 따라 침식 기준면이 깊어지면서 일어난 해침에 의한 것으로 해석된다. 해침이 일어나면서 퇴적된 이암층은 광역적인 덮개층을 형성하였다.

대상 지층의 저장능력과 주입능력을 평가하기 위해 CRC-1 코어시료에서 측정된 공극률과 투과도, 물리검층으로부터 계산한 공극률과 투과도를 검토

하였다(그림 5, 6; 표 1). 저류층의 공극률은 평균 25 ~ 30%로 매우 양호하며, 투과도도 수 다르시(Darcy)에 이를 정도로 양호하다. 공극률과 투과도는 퇴적상별로 큰 차이를 보인다(그림 5; 표 1). 저류층을 구성하는 주요 퇴적상인 근위사주와 분류하도의 시료는 공극률과 투과도가 뚜렷하게 높다. 반면에 덮개층의 주요 퇴적상인 말단사주, 삼각주전면 시료는 매우 낮게 측정되었다. 속성작용에 의해 침전된 교질물(cement section) 퇴적상은 공극률과 투과도가 현저하게 낮다. CRC-1 코어시료 분석에 의하면 대개 공극률이 20% 이하이고, 투과도가 4 mD 이하인 경우 비저류암으로 구분된다(표 2).

CRC-2 공의 주입 구간을 포함하는 저류층의 물리검층 자료로부터 계산한 공극률과 투과도 값은 코어에서 측정된 값과 대개 유사하며, 퇴적상에 따른

Table 2. Porosity and permeability of reservoir and non-reservoir in Paaratte Formation. Reservoir includes proximal mouth bar and distributary channel facies. Non-reservoir includes distal mouth bar, cement section and delta front facies.

Unit		Porosity			Permeability (mD)		
Code	Description	Low	Mean	High	Low	Mean	High
0	Non-reservoir	0.12	0.20	0.27	0.17	4.06	94.42
1	Reservoir	0.23	0.27	0.31	33.50	292.87	2560.30

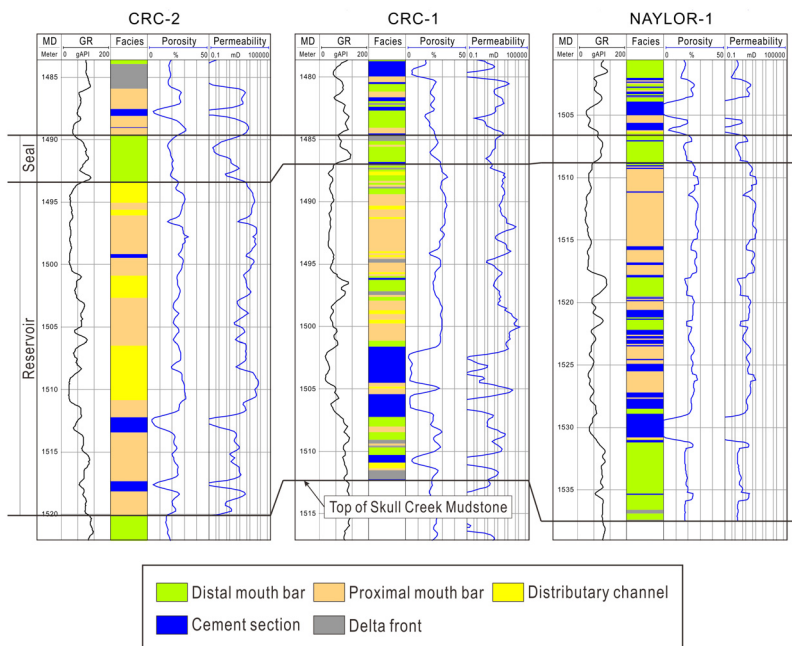


Fig. 4. Well log correlation of reservoir and seal intervals in the Paaratte Formation. For well location, see Figure 1.

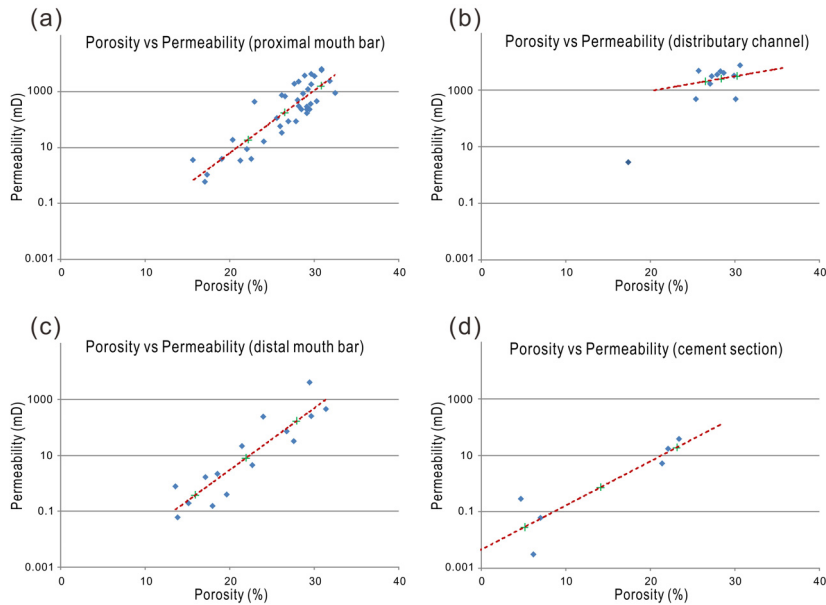


Fig. 5. Cross plot of porosity versus permeability for different types of facies, (a) proximal mouth bar, (b) distributary channel, (c) distal mouth bar, and (d) cement section in the Paaratte Formation.

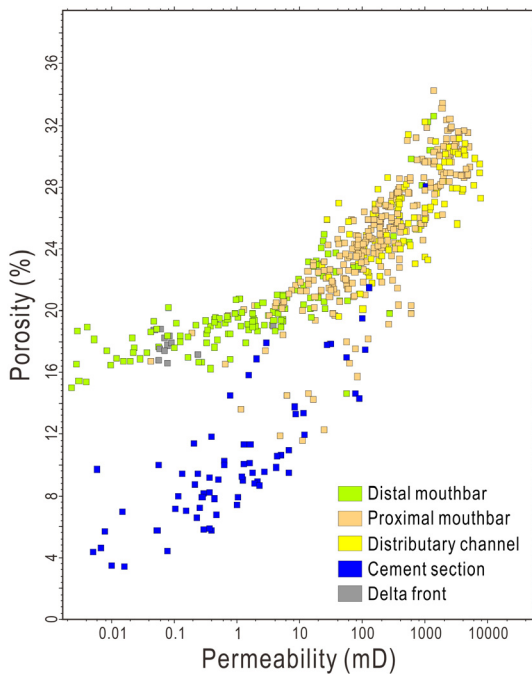


Fig. 6. Cross plot of porosity versus permeability derived from well log.

분포 양상도 매우 유사하다(그림 6). 투과도 값은 공극률과 상관성이 매우 높으며, 퇴적상에 따라 분포

범위가 한정된다.

4.2 3차원 지질격자

주입공을 포함하는 모델 영역의 총 면적은 325,000 m² 이다. 단위격자(cell)의 크기는 x, y 방향으로 15 m × 15 m 이고, 남쪽 경계단층의 방향(북서-남동)을 고려하여 약 70°로 기울어지게 배열하였다. 단위격자의 방향을 주요 지질구조인 단층 방향과 일치하게 배열하여 지질구조에 의한 이방성을 반영하고, 모델 경계의 바깥에 놓이는 노드(node)의 개수를 최소화할 수 있다(Anderson and Woessner, 1992).

탄성과 자료를 이용하여 저류층의 하부 경계면에 해당되는 반사면(Top Skull Creek Mudstone)을 대비하고 분포를 맵핑하여 지질격자 모델의 수평 경계면으로 삽입하였다(그림 7). 지질격자 모델에서 저류층과 덮개층은 CRC-1, CRC-2, Naylor-1 공과 인근의 시추공으로부터 계산한 두께를 이용하여 각각 삽입하였다(그림 7). 주입구간을 포함하는 저류층의 두께는 약 27 m, 상부 덮개층의 두께는 약 3 m 이다.

저류층 내에 발달하는 층형(stratal pattern)을 묘사하기 위해 레이어를 생성하였다. 레이어는 0.5 m 두께로 일정하고, 하부 경계면과 평행하게 설정하였

다(그림 7). 해침 퇴적계의 경우 내부에 발달하는 지층들이 하부 경계면을 따라 윗걸침(onlap)하며 채우는 층서적 관계가 있다. 지질격자 모델의 레이어를 상부 경계면과 평행하게 차례대로 배열하면 해침 퇴적계의 위걸침하는 층서적 관계를 모델에 반영할 수 있다. 반면에 고해수면 퇴적계는 상부 경계면을 따라 지층이 상향중식(toplap or truncation)하기 때문에 하부 경계면과 평행하게 레이어를 구성하는 것이 적절하다. 주입구간의 저류층은 삼각주 환경에서 전진구축하며 퇴적된 사암층이 우세하기 때문에 하부 경계면과 평행하게 레이어를 생성하여 저류층내 층서적 관계를 묘사하였다(그림 7).

수직 레이어의 두께는 저류층내 분포하는 퇴적상 두께의 비균질성을 고려하여 결정해야 한다. 사암 퇴적상(proximal mouth bar, distributary channel)은 수직 방향으로 누적되어 나타나기 때문에 수 m 두께로 비교적 두껍고, 이암 퇴적상(distal mouth bar, delta front, cement section)은 수 cm 혹은 수 m 두께로 두께가 다양하다. 이암 퇴적상이 저류층내에 협재할 경우 주입 이산화탄소의 흐름을 방해하기 때문에 이들의 수직적 분포를 묘사할 수 있도록 수직 레이어의 두께를 산정하였다. 시추공에서 구분한 퇴적상에 대해 수직 베리오그램 분석을 수행하여 각 퇴적상의 수직 상관관리를 유추하였고, 코어에서 관찰한 각 퇴적상의 수직적 두께 변화와 주기성 등을 고려하여 0.5 m 두께의 레이어를 생성하였다. 덮개층은 말단사주 환경에서 퇴적된 이암으로 연속성이 좋고, 균질한 지층이기 때문에 수직 레이어로 세분화하지 않았다. 지질격자 모델의 전체 단위격자의 개수는 118,440 이다.

4.3 퇴적상 분포 모델

세 개 시추공 위치에서 지질격자 모델에 퇴적상,

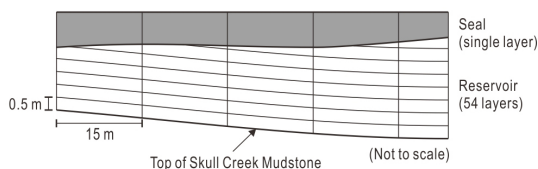


Fig. 7. Simplified structural grid containing multi-layer reservoir and single-layer seal. Note that each layer follows the lower boundary of reservoir.

공극률, 투과도 값을 할당하기 위해 업스케일을 수행하였다. 코어에서 구분한 교질물 퇴적상은 수직 레이어 두께인 0.5 m 보다 얇은 층으로 존재할 경우 업스케일한 셀에 표현되지 못한다. 이를 보완하기 위해 교질물 퇴적상은 업스케일 과정에서 다른 퇴적상들보다 높은 가중치를 주었다. 삼각주전면 퇴적상은 저류층내에 아주 제한적으로 나타나기 때문에 업스케일 과정에서 제외하고 모델에 반영하지 않았다. 업스케일한 퇴적상은 코어에서 구분한 원래 퇴적상과 유사한 비율로 나타난다(그림 8).

덮개층에 해당되는 구간은 말단사주 퇴적상 하나로 구성된다. 주입 저류층의 퇴적상 분포 모델링은 세 개 시추공에서 업스케일한 퇴적상을 입력자료로 활용하였고, 각 퇴적상의 수직 베리오그램 분석 결과를 기반으로 순차지표시뮬레이션을 이용하여 수행되었다. 즉, 시추공 위치에서 업스케일된 퇴적상은 원래 퇴적상과 비율이 거의 동일하고, 시추공 사이의 퇴적상 분포는 순차지표시뮬레이션 기법에 의해 예측되었다. 퇴적상 분포의 이방성(major and minor direction)과 연속되는 상관거리(range)는 코어, 물리검층 자료로부터 수평 베리오그램 분석하여 시뮬레이션에 반영할 수 있다. 연구지역은 시추공 수가 부족하여 각 퇴적상의 수평 베리오그램 분석이 어렵기 때문에 노두에 드러난 퇴적층에서 분석한 결과를 간접적으로 활용하였다(표 3). Paaratte 층과 퇴적환경이 유사한 고기의 지층과 현생의 퇴적 환경에 대한 연구결과를 검토하여 각 퇴적상 분포의

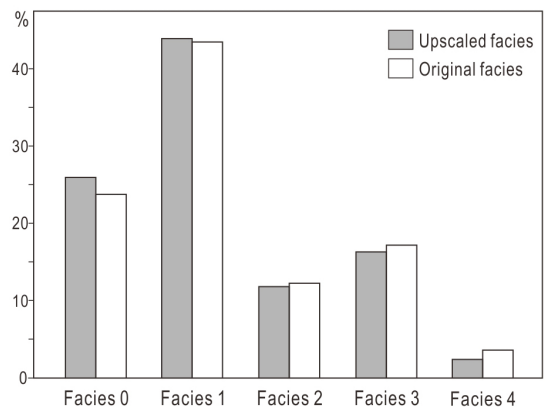


Fig. 8. Histogram showing proportion of upscaled and original facies. The upscaled facies preserve the proportions of the original facies. For facies codes, see Table 1.

Table 3. Variogram model for each facies.

Code	Facies		Azimuth (degree)	Major range (m)	Minor range (m)	Vertical range (m)
	Description					
0	Distal mouth bar		47	1000	1000	2
1	Proximal mouth bar		44	1000	800	1
2	Distributary channel		47	800	200	2
3	Cement section		59	30	30	1
4	Delta front		-	-	-	-

수평 상관거리 및 이방성을 다음과 같이 가정하였다.

삼각주 환경의 분류하도 사암은 두께와 폭의 비율이 1:50 정도로 알려져 있다(Tye, 2004). 코어에서 하도 사암의 최대 두께가 대개 4 m 임을 고려할 때 하도의 폭이 200 m 이하일 것으로 유추할 수 있다. 따라서, 분류하도의 길이는 최대 800 m 정도 연장성을 가지며 분포할 것으로 여겨진다(Gani and Bhattacharya, 2007).

말단사주와 삼각주전면 퇴적상은 마하캄 삼각주와 같은 현생 환경에서 수 십 km 규모로 분포하기 때문에 모델링 영역내에서 연속적으로 분포할 가능성이 높다. 실제로 덮개층을 구성하는 말단사주 퇴적상은 모든 시추공에서 연속적으로 나타나기 때문에 이방성을 고려하지 않았다.

저류층 내에 분포하는 교질물 퇴적상은 속성작용에 의해 2차적으로 형성된 산물이기 때문에 연속성과 규모를 예측하기 어렵다. Paaratte 층과 유사한 퇴적환경에서 퇴적된 암상의 노두 관찰에 의하면 교질물 퇴적상은 수평 방향으로 약 30 m, 수직 방향으로 2.5 m의 상관거리를 가지며(Dutton *et al.*, 2002), 지하투과레이더(Ground Penetrating Radar) 자료를 이용한 3차원 분포 예측에 의하면, 최대 두께가 1.0~1.4 m 이다(Lee *et al.*, 2007). 시추코어 관찰에서 수평 상관거리에 대한 분석이 불가능하기 때문에 노두 분석 결과를 바탕으로 수평 상관거리를 30 m로 가정하였다. 시추코어에서 교질물 퇴적상의 두께와 출현빈도가 매우 다양하여 수직 상관거리는 1 m로 작게 가정하였으며, 이방성은 고려하지 않았다.

Paaratte 삼각주 퇴적시스템의 발달은 퇴적 동시성 성장 단층의 발달과 관련이 있다. 북서-남동 방향의 성장 단층은 삼각주 퇴적시스템이 단층 방향과 수직인 북동-남서 방향으로 발달하였음을 지시한다.

Paaratte 층에 누적되어 있는 삼각주 퇴적체는 주로 북동-남서 방향으로 전진과 후퇴를 반복하면서 형성되었을 것이다. 따라서 분류하도, 근위사주 퇴적상의 분포는 주로 북동-남서 방향으로 우세하게 발달하였을 것으로 추측된다.

퇴적상 모델링 결과, 분류하도와 근위사주 퇴적상과 같은 저류층은 북동-남서 방향으로 발달하는 이방성과 연속성이 적절하게 묘사되었고, 교질물 퇴적상은 불연속으로 분포한다(그림 9a). 말단사주 퇴적상은 저류층 하부 구간에 우세하게 분포하고 상부로 가면서 분류하도와 근위사주 퇴적상이 우세한 경향이 나타난다(그림 10a). 이러한 경향은 물리검층과 코어자료 분석에서 인지된 상향 조립화 경향이 모델에 반영되어 있음을 보여준다. 퇴적상 모델에서의 가장 큰 불확실성은 교질물 퇴적상의 분포 양상이다. 모델에서 입력한 수평 상관거리가 작고, 이방성을 고려하지 않았기 때문에 교질물 퇴적상의 분포가 단속적이다(그림 9, 10). 주입 지층의 주요 저류층인 분류하도와 근위사주는 투과도가 매우 양호하기 때문에, 주입 이산화탄소의 흐름은 교질물 퇴적상의 횡적 연속성과 방향성에 의해 주로 영향을 받을 것으로 여겨진다. 속성작용과 탄산염 교질물 침전과 용해 기작을 이해하고 분포 특성을 파악하기 위해서는 고퇴적환경의 수직적, 수평적 변화에 대한 해석이 필요하다.

4.4 물성 분포 모델

시추공 사이의 공간에서 공극률 분포를 예측할 만한 직접적인 자료가 불충분하고, 공극률의 공간적 분포를 간접적으로 지시할 수 있는 3차원 탄성속성(attribute) 분석 결과가 불량하기 때문에 세 개 시추공에서 업스케일한 공극률 자료를 이용하여 공간

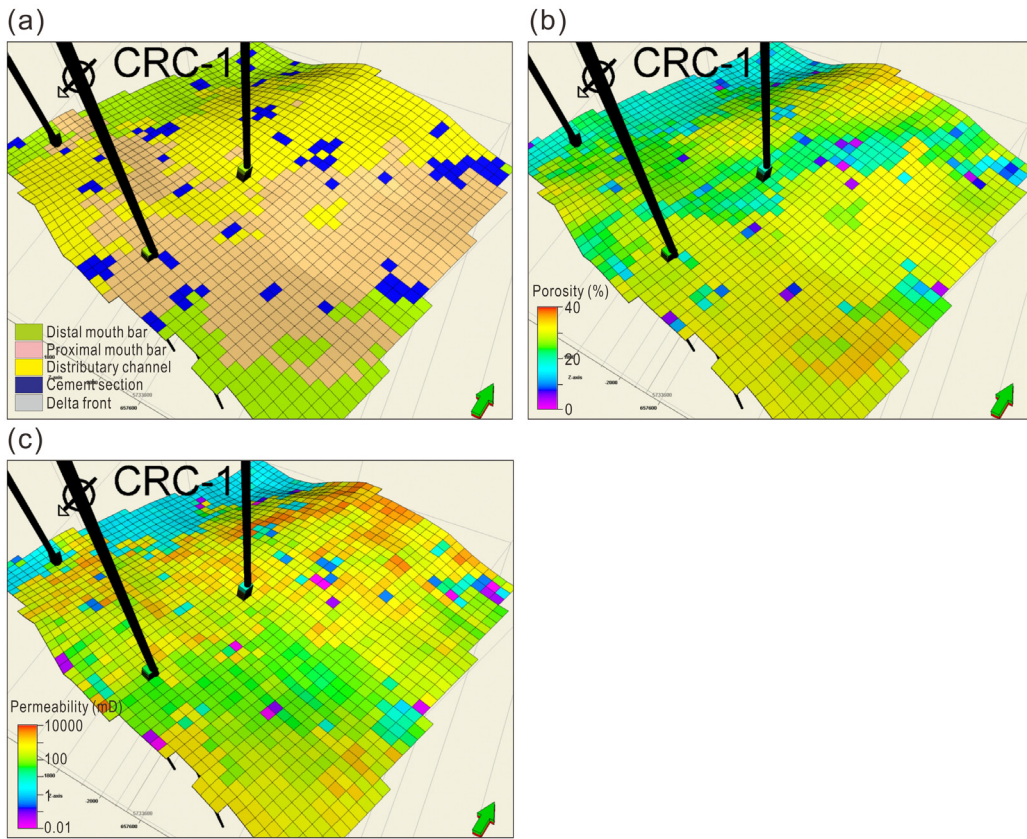


Fig. 9. (a) Facies model built by variogram-based, Sequential Indicator Simulation method, (b) Porosity model guided by the facies distribution (used as secondary data), (c) Permeability model co-krigged with the porosity. Sequential Gaussian Simulation method was used to model porosity and permeability.

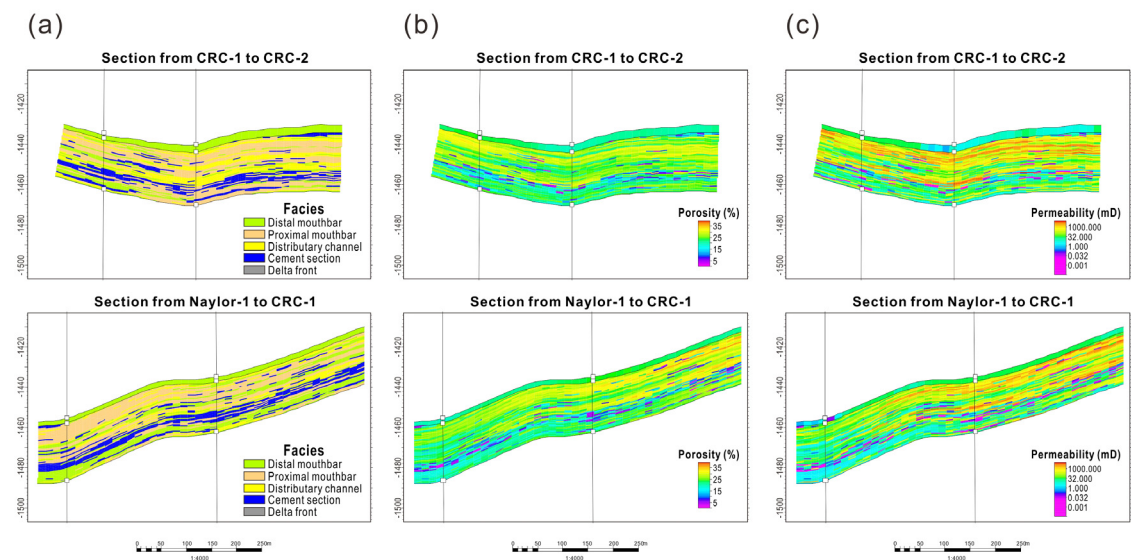


Fig. 10. Cross-sectional views of (a) facies, (b) porosity, and (c) permeability models.

적 분포를 예측하였다. 물리검층 자료에서 계산한 공극률은 각 퇴적상에 따라 분포가 상이하다(그림 6). 즉, 공극률의 공간적 분포는 저류층내 퇴적상 분포 경향을 반영한다. 따라서, 공극률 분포를 예측하기 위해 퇴적상 분포 모델링 결과를 반영하는 조건부 시뮬레이션을 수행하였고, 순차가우시안 시뮬레이션 기법을 이용하였다.

순차가우시안 시뮬레이션 기법은 정규분포를 가지는 자료에 대해 지구통계적 분포 예측이 유용하다. 시추공 위치에서 공극률 값들이 정규분포를 가지도록 변환(normal score transformation)하고 순차가우시안 시뮬레이션을 이용하여 모델링을 수행한 후 다시 자료를 역변환(back transformation)하여 공극률 모델 결과를 얻었다. 순차가우시안 시뮬레이션은 시추공 사이의 공간에서 공극률을 무작위로 계산하지만 시추공 위치에서 공극률 값이 가지는 통계학적 특성은 최종 모델의 전체 공극률의 통계학적 특성과 일치한다. 시추공 개수가 충분하지 않기 때문에 수평 베리오그램 분석을 통한 공극률 분포의 이방성과 상관거리는 반영하지 않았다. 그럼에도 불구하고, 각 퇴적상별로 공극률의 분포를 예측하였기 때문에 최종 공극률 모델은 퇴적상의 공간적 비균질성을 잘 반영하고 있다(그림 9b, 10b). 즉, 고공극률은 근위사주, 분류하도 퇴적상과 같이 사암이 우세한 퇴적상에서 뚜렷하게 나타난다.

투과도 모델링은 순차가우시안 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 투과도 변화와 공극률 변화의 상관성이 매우 높기 때문에 선택된 공극률 모델링 결과를 공동크리깅(co-kriging)으로 반영하였다. 또한, 공극률 모델링과 마찬가지로 퇴적상 분포 모델을 조건부 자료로 활용하였다. 따라서, 투과도의 공간적 분포는 불균질한 퇴적상의 분포 경향을 반영하고, 예측된 공극률의 분포 경향과 유사하다(그림 9c, 10c).

저류층 하부에 넓게 분포하는 말단사주 퇴적상의 분포로 인해 저류층 하부는 투과도가 낮고, 상부로 가면서 투과도가 높아진다(그림 10c). 저류층 상부 구간에서 이산화탄소를 주입할 경우 분류하도 퇴적상의 투과도가 높기 때문에 이들의 수직 및 수평적 연속성에 따라 이산화탄소의 이동 양상이 달라질 것으로 여겨진다. 분류하도 퇴적상은 대개 근위사주 퇴적상과 교호하며, 두 퇴적상의 투과도는 모두 상호하기 때문에 분류하도 퇴적상의 연속성과 이방성

이 불확실하더라도 이산화탄소의 이동에 큰 영향은 없을 것으로 여겨진다. 반면에 낮은 투과도를 가지는 교질물 퇴적상의 분포가 이산화탄소 흐름을 지연시키거나 방해하는 주요한 요인이 될 것이다.

5. 주입 이산화탄소 거동 시뮬레이션

5.1 덮개암의 효율과 상대투과도

CRC-2 공 주입 지층을 구성하는 퇴적상을 대상으로 수은주입모세관압(mercury injection capillary pressure, MICP) 시험 방법으로 침투압(entry pressure)을 측정하였다(Daniel *et al.*, 2011). 이 때, 이산화탄소가 주입되는 구간의 압력과 온도, 그리고 이미 공극을 점유하고 있는 물의 염도를 고려하였고, 덮개암이라는 가정 하에 이산화탄소가 투과하기 위해서 요구되는 압력을 나타내는 이산화탄소 칼럼(column)의 높이를 측정하였다.

이산화탄소 칼럼의 높이는 교질물 퇴적상에서 1.2~197 m의 넓은 범위를 구성하는 반면, 저류암의 경우 1.2~10.3 m로 상대적으로 좁은 범위를 구성한다. 이러한 두 개의 다른 범위를 바탕으로 앞의 정적 모델링에서 선정한 다섯 개 퇴적상에 대한 침투압을 유추하였다.

상대투과도에 대한 모델은 석유분야에서 흔히 쓰는 Brooks-Corey의 모델(Brooks and Corey, 1964)을 따랐다. 어느 한 유체의 상대투과도는 그 유체의 실질적인 포화도에 의한 함수로 습윤상(wetting phase) 유체의 유효포화도(Swe)는 다음 식과 같이 정의된다.

$$S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} = \left(\frac{P_d}{P_c} \right)^\lambda \quad (1)$$

Sw : water saturation (물의 포화도)

Swr : residual water saturation (물의 잔류포화도)

Pd : entry pressure (침투압)

Pc : capillary pressure

(물과 이산화탄소간의 모세관압)

λ : Brooks-Corey 모델의 상수

수식 1에서 보는 바와 같이 침투압과 Brooks-Corey 모델 상수 λ, 그리고 퇴적상에 따른 물의 잔류포화

Table 4. Summary of Brooks-Corey parameters for each facies.

Code	Description	CO ₂ column height (m)	Pd (Pa)	λ (-)	Swr (-)
0	Distal mouth bar	95	545191	2.49	0.098
1	Proximal mouth bar	10	57389	3.51	0.069
2	Distributary channel	2	11478	3.86	0.078
3	Cement section	190	1090382	3.30	0.098
4	Delta front	197	1130553	3.30	0.189

Table 5. Summary of Brooks-Corey parameters for reservoir and seal.

Code	Description	Pd (Pa)	λ (-)	Swr (-)
0	Seal	573885	2.49	0.098
1	Reservoir	28694	3.89	0.078

도(residual saturation) 등이 앞서 소개한 Daniel 등이 측정한 이산화탄소의 컬럼 높이에서 유추하여 표 4와 5에 정리하였다. 다섯 개 퇴적상들을 대상으로 뒷개암의 효율과 상대투과도를 Brooks-Corey 모델로 표현함으로써 다상유체의 특성이 규명되었다.

5.2 시뮬레이션 조건

이산화탄소 주입과 거동 시뮬레이션을 위해 CRC-2 공의 주입구간에 150일 동안 159 톤/일의 이산화탄소를 주입하는 것으로 가정하였다. 이산화탄소 주입 전의 초기조건은 저류층 내에 염수가 공극을 점유하고 있고, 주어진 심도에서 정수압(hydrostatic) 조건을 만족하는 것으로 가정하였다. 이는 대수층에 존재하는 물이 외부의 영향이 없을 경우 움직이지 않고 정적으로 존재하는 상태를 가정한다. 그리고 경계조건인 경우에는 가장 적은 수의 노드만을 정해서 초기조건과 마찬가지로 정수압 조건을 물의 압력과 상응하는 모세관압을 계산해서 설정하였다.

앞서 가정한 동적 모델링의 초기조건과 경계조건, 약 24,000 톤 정도의 이산화탄소를 주입하기 위한 주입조건과 주입구간, 그리고 정적 모델링에서 구현한 다섯 개의 퇴적상에 대한 Brooks-Corey 모델의 재해석을 완성하면, 예비적인 이산화탄소 주입에 대한 최소한의 모델링 조건이 구성된다. 이에 기초해서 총 92,205개의 노드와 총 86,039개의 요소로 이루어진 동적모델링 도메인을 구성했다. 0.5일 시간간격으로 150일 동안 이산화탄소를 주입하는 시뮬레이션을 수행하였다.

5.3 이산화탄소 주입 시뮬레이션

다섯 개의 퇴적상으로 구성된 비균질한 지질 모델을 기반으로 이산화탄소를 주입한 경우, 주입구간을 중심으로 분포한 퇴적상들의 비균질한 물성을 반영하여 이산화탄소 플룸이 확장되는 점을 관찰할 수 있다. 이를 3차원으로 도시하기 위해서 이산화탄소 포화도 분포를 그림 11에 도시했다. 이 경우에는 물성에 따라 다상유체유동에서 보여주는 단속적인(discrete) 구분이 일어남을 잘 관찰할 수 있다. 즉, 비균질한 지질 모델에서 이산화탄소 플룸은 주입구간을 따라 규모와 형태가 다양하고, 횡적 이동의 정도가 상이하며, 포화도의 차이가 관찰된다. 이산화탄소 포화도는 주입 구간의 하부에서 상대적으로 높고, 상부로 가면서 작아진다. 이산화탄소 플룸은 전반적으로 하부에서 넓게 퍼지고 상부에서 분포 범위가 좁은 피라미드형으로 발달한다(그림 11). 레이어 규모에서 일어나는 현상을 살펴보면, 투과도가 좋은 레이어에 주입된 이산화탄소는 횡적 이동이 일어나기 시작한다. 상부에 불투과성 레이어가 존재할 경우, 불투과성 레이어의 모세관압이 주입 이산화탄소의 상태압(phase pressure)보다 크기 때문에 이산화탄소의 수직 이동이 제한되며, 하부 레이어에서 이산화탄소는 계속 누적되고 수평방향으로 넓게 퍼지게 된다. 주입이 계속되는 동안 이산화탄소의 상태압이 침투압을 극복하게 되면 상부의 불투과성 레이어로 침투가 일어나고, 다시 수평 방향으로의 횡적 이동이 일어나는 현상이 반복적으로 나타난다. 이러한 현상은 저류층 내에 분포하는 불투과성 퇴적상의 연속성과 분포에 영향을 받는 것으로 해석된다. 주

입 조건에서 이산화탄소 플룸은 덮개암에 의해 분리되어 저장되는 모습을 관찰할 수 있다.

저류암과 비저류암으로 구분한 단순한 지질 모델에 이산화탄소를 주입한 경우, 주입구간을 중심으로 분포한 저류암 혹은 비저류암의 물성을 반영하여 이산화탄소의 플룸이 확장되는 점을 관찰할 수 있다. 이를 3차원으로 관찰하기 위해서 이산화탄소 포화도 분포도를 그림 12에 도시했다. 단순한 지질 모델에서 이산화탄소 플룸은 규모, 형태, 이동 정도, 포화도가 비교적 단조롭고 균질한 것이 특징이다. 전반적으로 이산화탄소 플룸은 수평 이동 보다 밀도차에 의한 수직 이동이 일어나 실린더형으로 발달한다(그림 12). 비균질한 지질 모델에 대한 이산화탄소 거동 시뮬레이션과 다른 차이를 보이는 것은 염수층내에 분포하는 불투과성 퇴적상의 분포가 단조롭고 흐름을 방해하는 효과가 낮기 때문이다. 현재 시뮬레이션 조건하에서 단순한 지질 모델의 덮개층은 주입 이산화탄소를 충분히 막지 못하고 누출이 일어난다. 이는 실제 누출 가능성을 지시하기 보다 균질한 물성의 지질 모델에서 이산화탄소 주입에 따른 동적 물성의 변화가 단순화되어 나타난 결과로 해석된다.

6. 결 론

호주 오프웨이 CCS 프로젝트의 주입 대상 지층은 삼각주 환경에서 퇴적된 사암으로 공극률과 투과도가 매우 양호한 대수층이다. 지질구조에 의한 자연적 밀폐가 어려운 대수층에서는 주입된 이산화탄소의 동적 거동과 상부 덮개능력에 대한 예측이 중요하다. 이러한 동적 모델의 기반이 되는 대수층의 퇴적상, 공극률, 투과도의 공간적 분포를 묘사하고, 이산화탄소의 거동을 예측하는 시뮬레이션을 수행하였다.

시추코어로부터 다섯 개의 퇴적상을 구분하였고, 각 퇴적상의 수직적, 수평적 분포 경향을 파악한 후 지구통계 기법을 이용하여 퇴적상의 공간적 분포를 예측하였다. 코어시료로부터 측정한 공극률은 퇴적상에 따라 분포 양상이 다르다. 예측된 퇴적상 분포를 공극률 분포에 반영하기 위해 각 퇴적상 별로 공극률 값의 분포를 순차가우시안 시뮬레이션을 이용하여 예측하였다. 코어시료와 물리검층 분석 결과는 투과도가 공극률과 상관성이 높음을 보여준다. 이러한 상관성을 고려하여 투과도 분포는 예측된 공극률을 공동크리깅의 이차변수로 선정하고 지구통계 기

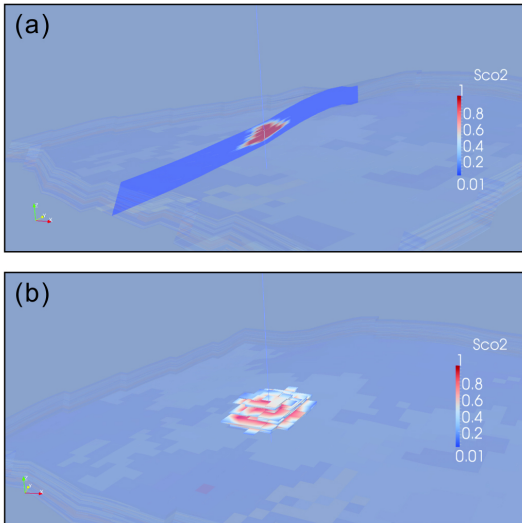


Fig. 11. Simulated CO₂ saturation and migration for heterogeneous facies model. Simulation time is 50 days. (a) CO₂ plume with saturation larger than 0.01. (b) Cross-sectional view of CO₂ saturation. (c) Three dimensional view of CO₂ saturation. (d) CO₂ plume sealed by seal formation.

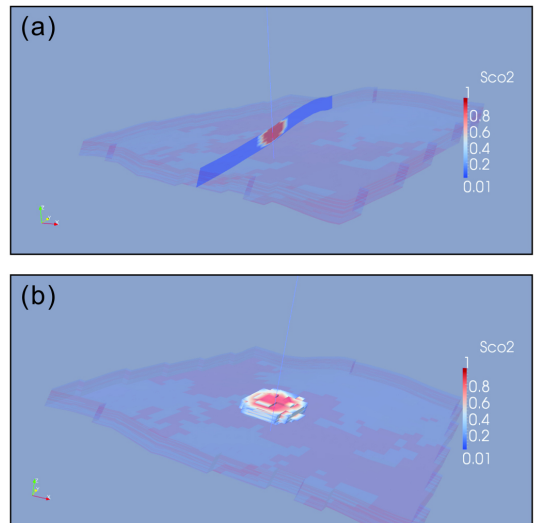


Fig. 12. Simulated CO₂ saturation and migration for homogeneous facies model. Simulation time is 50 days. (a) CO₂ plume with saturation larger than 0.01. (b) Cross-sectional view of CO₂ saturation. (c) Three dimensional view of CO₂ saturation. (d) Breakthrough of CO₂ plume into seal formation.

법에 의해 예측하였다.

다섯 개의 퇴적상으로 구성된 대수층과 저류암-비저류암의 이분화된 대수층을 대상으로 주입된 이산화탄소의 거동과 덮개층에 미치는 영향을 비교하였다. 퇴적상 분포 기반 시뮬레이션은 퇴적상에 따른 물성의 비균질한 특성에 따라 이산화탄소 플룸의 형태가 다양하고 단속적으로 확장되는 반면, 이분화된 대수층에서 이산화탄소는 비교적 균질하게 확장되는 현상을 보여준다. 가정한 시뮬레이션 조건에서 이분화된 대수층을 덮고 있는 덮개층은 주입 이산화탄소의 흐름을 막지 못하고 누출이 일어난다. 시뮬레이션 결과는 비균질한 퇴적상 분포가 이산화탄소 주입에 따른 대수층의 물성 변화, 플룸의 거동에 영향을 주는 하나의 요인임을 보여준다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 주관하에 한국에너지기술평가원의 지원에 의한 “호주 오프쇼어 파일럿 프로젝트 참여를 통한 지중저장 실증 기반구축” 사업과 “포항분지 해상 소규모 CO₂ 주입실증 프로젝트” 사업의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구 지원에 감사드립니다. 자료 제공에 협조해 주신 호주 CO₂CRC 관계자 분들께 감사드립니다. 원고를 세심하게 검토하시어 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원들께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Anderson, M.P. and Woessner, W.W., 1992, Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego, 381 p.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1964, Hydraulic properties of porous media. Colorado State University Hydrology Paper No. 3, 27 p.
- Bunch, M.A., 2013, Gauging geological characterisation for CO₂ storage: the Australasian experience so far... Australian Journal of Earth Sciences, 60(1), 5-21.
- Bunch, M.A., Lawrence, M., Dance, T., Daniel, R.F., Menacherry, S., Browne, G. and Arnot, M., 2012, Multi-scale characterisation of the Paaratte Formation, Otway Basin, for CO₂ injection and storage. AAPG International Conference and Exhibition (abstracts), Singapore, September 16-19, 1 p.
- Coleman, J.M. and Prior, D.B., 1982, Deltaic environments of deposition. In: Scholle, P.A. and Spearing, D. (eds.), Sandstone depositional environments. AAPG Memoir, 31, 139-178.
- Daniel, R., Menacherry, S. and Bunch, M., 2011, Characterisation of dolomitic intraformational barriers, CRC-2b injection zone, Paaratte Formation, CO₂CRC Otway Project. CO₂CRC Research Symposium 2011 (Abstracts), Adelaide, Australia, 29 November - 1 December, 78 p.
- Doughty, C., 2010, Investigation of CO₂ plume behavior for a large-scale pilot test of geologic carbon storage in a saline formation. Transport in Porous Media, 82(1), 49-76.
- Dutton, S.P., White, C.D., Willis, B.J. and Novakovic, D., 2002, Calcite cement distribution and its effect on fluid flow in a deltaic sandstone, Frontier Formation, Wyoming. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 86(12), 2007-2021.
- Finlayson, D.M., Johnstone, D.W., Owen, A.J. and Dyster, K.D., 1996, Deep seismic images and the tectonic framework of early rifting in the Otway Basin, Australian southern margin. Tectonophysics, 264, 137-152.
- Flett, M., Gurton, R. and Weir, G., 2007, Heterogeneous saline formations for carbon dioxide disposal: Impact of varying heterogeneity on containment and trapping. Journal of Petroleum Science and Engineering, 57(1), 106-118.
- Gallagher, S.J., Taylor, D., Aphorpe, M., Stilwell, J.D., Boreham, C.J., Holdgate, G.R., Wallace, M.W. and Quilty, P.G., 2005, Late Cretaceous dysoxia in a southern high latitude siliclastic succession, the Otway Basin, southeastern Australia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 223, 317-348.
- Gani, M.R. and Bhattacharya, J.P., 2007, Basic building blocks and process variability of a Cretaceous delta: internal facies architecture reveals a more dynamic interaction of river, wave, and tidal processes than is indicated by external shape. Journal of Sedimentary Research, 77(4), 284-302.
- Geary, G.C. and Reid, I.S.A., 1998, Hydrocarbon prospectivity of the offshore eastern Otway Basin, Victoria - for the 1998 Acreage Release. Victorian Initiative for Minerals and Petroleum Report 55, Department of Natural Resources and Environment, 110 p.
- Hill, K.A., Cooper, G.T., Richardson, M.J. and Lavin, C.J., 1994, Structural framework of the Eastern Otway Basin: Inversion and interaction between two major structural provinces. Exploration Geophysics, 25, 79-87.

- Jenkins, C., Sharma, S. and Morvell, G., 2008, Assessing a saline aquifer for CO₂ storage: the CO2CRC Otway Project Stage 2. Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies, Canberra, Australia, CO2CRC Publication Number RPT08-1147, 29 p.
- Lawrence, M., Arnot, M., Browne, G., Bunch, M., Menacherry, S. and Dance, T., 2011, Sedimentological Interpretation of Core from Otway Project Well CRC-2. CO2CRC Research Symposium 2011 (Abstracts), Adelaide, Australia, 29 November – 1 December, 82 p.
- Lee, K., Gani, M.R., McMechan, G.A., Bhattacharya, J.P., Nyman, S.L. and Zeng, X., 2007, Three-dimensional facies architecture and three-dimensional calcite concretion distributions in a tide-influenced delta front, Wall Creek Member, Frontier Formation, Wyoming. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 91(2), 191-214.
- Lengler, U., De Lucia, M. and Kühn, M., 2010, The impact of heterogeneity on the distribution of CO₂: Numerical simulation of CO₂ storage at Ketzin. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4(6), 1016-1025.
- Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S. and Aiken, T., 2010, Geological storage of CO₂ in saline aquifers-A review of the experience from existing storage operations. International Journal of Greenhouse Gas Control, 4(4), 659-667.
- Middleton, M.F. and Falvey, D.A., 1983, Maturation modeling in Otway Basin, Australia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 67(2), 271-279.
- Park, C.H., Shinn, Y.J., Park, Y.C., Huh, D.G. and Lee, S.K., 2014, PET2OGS: Algorithms to link the static model of Petrel with the dynamic model of OpenGeoSys. Computers & Geosciences, 62, 95-102.
- Pevzner, R., Urosevic, M., Caspari, E., Galvin, R.J., Madadi, M., Dance, T., Shulakova, V., Gurevich, B., Tcheverda, V. and Cinar, Y., 2013, Feasibility of time-lapse seismic methodology for monitoring the injection of small quantities of CO₂ into a saline formation, CO2CRC Otway Project. Energy Procedia, 37, 4336-4343.
- Tye, R.S., 2004, Geomorphology: An approach to determining subsurface reservoir dimensions. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 88(8), 1123-1147.

투 고 일 : 2014년 4월 5일

심 사 일 : 2014년 4월 14일

심사완료일 : 2014년 6월 24일