

## 이산화탄소 지중저장 모델링: 저투수 이질협재층이 이산화탄소 거동에 미치는 영향

한아름<sup>1,2</sup> · 김태희<sup>2</sup> · 권이균<sup>1</sup> · 구민호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 지질환경과학과

<sup>2</sup>한국지질자원연구원

### Modeling Geologic Storage of Carbon Dioxide: Effects of Low-permeability Layer on Migration of CO<sub>2</sub>

Ahreum Han<sup>1,2</sup> · Taehee Kim<sup>2</sup> · Yikyun Kwon<sup>1</sup> · Min-Ho Koo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

#### ABSTRACT

TOUGH2 was used to simulate the migration of CO<sub>2</sub> injected into a sandy aquifer. A series of numerical simulations was performed to investigate the effects of a low-permeability layer (LPL) embedded in the aquifer on the injection rate and the pressure distribution of CO<sub>2</sub>. The results show that the size and location of the LPL greatly affected the spread of CO<sub>2</sub>. The pressure difference between two points in the aquifer, one each below and above the LPL, increased as the size of the LPL increased, showing a critical value at 200 m, above which the size effect was diminished. The location of the LPL with respect to the injection well also affected the migration of CO<sub>2</sub>. When the injection well was at the center of the LPL, the injection rate of CO<sub>2</sub> decreased by 5.0% compared to the case with no LPL. However, when the injection well was at the edge of the LPL, the injection rate was decreased by only 1.6%. The vertical distance between the injection point and the LPL also affected the injection rate. The closer the LPL was to the injection point, the lower the injection rate was, by up to 8.3%. Conclusively, in planning geologic storage of CO<sub>2</sub>, the optimal location of the injection well should be determined considering the distribution of the LPL in the aquifer.

**Key words :** TOUGH2, Geologic storage of carbon dioxide, Low-permeability layer, Sensitivity analysis, Numerical modeling

#### 1. 서 론

이산화탄소의 대기 중 농도는 1970년 이후 급속도로 발전한 산업에 따른 배출로 인해 급속도로 증가하고 있다 (IPCC, 2014). 이에 따른 지구온난화를 해결하기 위한 한 방법으로 배출된 이산화탄소를 지중에 저장하는 방안이 제시되었으며 1996년 노르웨이의 Sleipner 프로젝트를 시작으로 현재 세계적으로 15개의 대규모 프로젝트가 진행 중이다(GCCSI, 2015).

국내에서도 2020년까지 100만 톤의 이산화탄소 실증주

입을 추진하기 위해 저장층으로 유망한 여러 퇴적분지에 대한 예비 평가가 수행된바 있다. 현재까지 진행된 국내 저장층 선정에 대한 연구사례를 살펴보면, 먼저 육상분지인 경상분지 신동층군의 암상분포는 사암과 층상 형태의 이암이 반복으로 나타나는 것으로 확인된다(Egawa et al., 2009). 또한 경상분지 하산동층도 약 1,000 m 두께의 사암과 이암의 교호층 및 호상 퇴적층으로 구성되어 있으며 (Kihm et al., 2013a), 북평분지도 동일한 퇴적구조를 보이는 것으로 확인된다(Kihm et al., 2013b). 현재 이산화탄소 주입 실증 프로젝트가 진행되고 있는 포항분지는 해

\*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

Received : 2017. 3. 6 Reviewed : 2017. 3. 28 Accepted : 2017. 6. 16

Discussion until : 2017. 8. 31

양 퇴적분지로 시추코어 분석결과 앞서 제시한 몇몇의 국내 육상분지와 마찬가지로 사암과 역암층 사이에 이암이 협재되어 나타난다(Kwon, 2015).

최근 국외에서 저투수 이질협재층이 교호되어 나타나는 퇴적분지에 이산화탄소를 저장할 경우 어떤 영향이 있는지에 대한 연구를 진행한 바 있다. 저투수 이질협재층이 존재하지 않는 저장층 내에서는 주입된 이산화탄소가 부력에 의해 저장층 상부로 상승하게 된다(Bryant et al., 2006). 이때 이산화탄소 상승구간 내에 저투수 이질협재층이 존재할 경우 그 하부의 이산화탄소 잔류량이 증가하고 거동성이 현저히 떨어지는 수용액상의 이산화탄소량이 증가하게 된다(Han et al., 2010). 이산화탄소 저장층 내 여러 개의 저투수 이질협재층이 존재하는 저장층의 경우에는 이산화탄소를 주입했을 때 많은 저투수층에 의해 이산화탄소 거동양상이 불규칙적으로 나타나며 저장층 상부의 이산화탄소 포화도가 감소하고 각 저투수층 아래에 잔류된 이산화탄소량이 증가하게 된다(Green and Ennis-King, 2010). 이전 연구들은 이산화탄소를 정량으로 주입하여 저장층 내 동일한 이산화탄소량에 대한 거동양상 및 저장메커니즘을 초점으로 모델링을 수행하였다. 하지만 이산화탄소는 저장층 내 압력에 따라 주입량이 달라지므로 (Szulczewski et al., 2014), 저장층 내 저투수 이질협재층의 분포가 저장층 압력변화에 미치는 영향과 그에 따른 이산화탄소 총 저장량변화에 대한 연구가 필요하다. 또한 이산화탄소 저장효율은 이산화탄소 거동뿐만 아니라 주입시 나타나는 압력증가에 의해 결정되므로 예비평가 단계

에서 저투수층의 분포에 따른 이산화탄소 거동 및 저장층의 압력변화에 대한 연구가 반드시 수행되어야 한다(Van der Meer, 1992; Okwen et al., 2010).

따라서 본 연구에서는 이산화탄소를 정압주입하여 위치, 크기가 다른 저투수층이 존재하는 저장층의 압력과 이산화탄소 저장량 변화에 대해 정량적으로 비교분석하고자 하였다.

## 2. 개념모델

다상, 다성분의 유체 거동과 열 이동 수치모델이 가능한 TOUGH2 (Pruess et al., 1999)를 사용하여 이산화탄소 주입 모델링을 수행하였다. 심부 염대수층을 대상으로 주입 모델링을 실시하기 위해 water, brine, CO<sub>2</sub>-rich phase 성분을 다루는 ECO2N 모듈(Pruess and Spycher, 2007)을 사용하였다.

본 연구에서는 이산화탄소 해상주입을 가정하여 크기가 1000 m × 1000 m × 20 m인 3차원 염대수층으로 설정하였다. 모델의 격자는 주입정 부근을 세분화하여 주입정 지름인 30 cm부터 최대 200 m 크기까지 총 20,250개의 셀로 구성하였다.

개념모델 입력변수는 이산화탄소 저장층으로 유력한 포항분지의 데이터 값을 이용하였다. 포항분지 영일만에서 약 1 km 심도의 해상시추를 통해 약 700 m 이하의 깊이에서 초임계상태의 이산화탄소 조건이 만족되며 그 중 사암과 역암이 우세한 구간을 저장층으로 구분하였다. 이 구

Table 1. Model input parameters

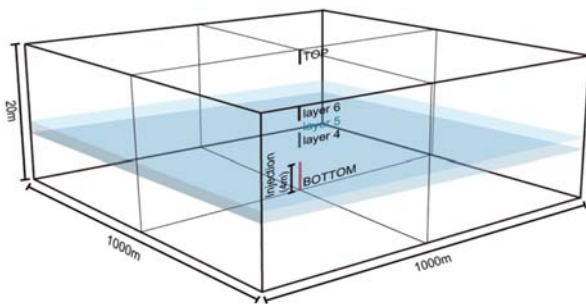
Parameters		Value		
Initial Pressure (Mpa)		8.0		
Initial Temperature (°C)		45.0		
Porosity		0.25	0.05	
X, Y Permeability (mD)	Sand	60	Shale 0.1	
Z Permeability (mD)		30	0.1	
Formation	Salinity (‰)	15		
	Relative permeability (Corey's Curves)			
	Residual water saturation	0.3		
	Residual gas saturation	0.05		
	Capillary pressure (van Genuchten Function)			
	Exponent	0.457		
van Genuchten $\alpha$ (Pa <sup>-1</sup> )	5.1 × 10 <sup>-4</sup>			
Carbon dioxide	Injection Pressure (Mpa)	9.5		
	Injection Temperature (°C)	30.0		
	Injection duration (year)	10		
	Observation duration (year)	100		

간 내에는 사암, 역암과 같은 조립질 입자와 함께 이암이 협재되어 나타나며, 이를 고려한 물성분석 값은 공극률 0.14~0.28%, 투과도 0.2~108 mD의 넓은 범위를 보인다. 본 연구에서 이 데이터 값을 반영하여 사암으로 가정한 저장층의 공극률은 0.25, 수평 투과도는 60 mD로 설정하였으며, 수직 투과도는 수평방향의 1/2 값을 사용하여 이방성 저장층을 가정하였다. 저장층의 압력과 온도는 초임계상태의 이산화탄소 저장에 적합한 8.0 Mpa, 45°C로 설정하였다. 저장층 내 교호하며 나타나는 이암은 공극률 0.05, 투과도 0.1 mD, 2 m 두께의 하나의 층으로 설정하였으며, 그 크기와 위치에 따른 저장층 압력 및 이산화탄소 주입량변화를 분석하기 위해 넓이 및 위치에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

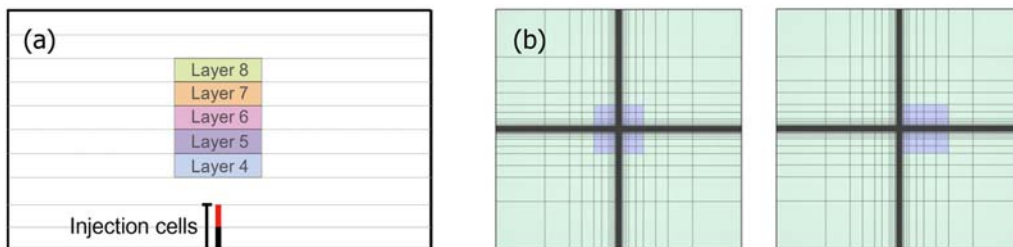
이산화탄소 주입을 모의하기 위해 20 m 두께의 저장층을 10개의 층(layer)으로 나눈 뒤 가장 아래 두개의 층(layer 1, 2) 4 m 구간에 주입정의 스크린을 설치하여 이산화탄소가 주입되는 것으로 가정하였다(Fig. 1). 이산화

**Table 2.** Effects of horizontal location of low-permeability layer (LPL) on CO<sub>2</sub> injection

Location of LPL	Amount of stored CO <sub>2</sub> (ton)	Increase rate (%)
No layer (case 1-1)	1.08E+6	0
Above (case 3-2)	1.03E+6	-5.02
Beside (case 3-3)	1.07E+6	-1.58



**Fig. 1.** Three-dimensional domain of the conceptual model.



**Fig. 2.** Location of the low-permeability layer (LPL): (a) vertical (cases 2-1~2-5) and (b) horizontal (cases 3-1 and 3-2) locations.

탄소의 주입압력과 주입 온도는 9.5 Mpa, 35°C이며, 총 10년 동안 주입되도록 모의하였다. 이산화탄소 주입 중단 후에는 100년 동안 추가적인 모의를 수행하여 대수층에서의 이산화탄소 거동을 다음과 같이 분석하였다.

첫째, 이산화탄소 주입 시 저투수 이질협재층의 면적에 따른 이산화탄소 주입량과 저장층 내 압력 변화 비교를 위해 민감도 분석을 수행하였다(case 1). 저투수층은 주입정을 중심으로 정사각형으로 설정하고 두께는 2 m로 고정하였다. 저투수층의 넓이에 따른 변화양상을 살펴보기 위하여 저투수층이 없는 모델부터 한 변의 길이가 24 m, 40 m, 80 m, 200 m, 400 m, 600 m까지 총 7개 모델(case 1-1~1-7)에 대한 모의 결과를 분석하였다. 둘째, 저투수 이질협재층과 주입정의 수직거리 차이가 주입에 미치는 영향에 대한 분석을 위해 case 1과 동일한 모델과 같이 정사각형의 저투수층으로 가정하고 수직 위치를 layer 8부터 layer 4까지 일정한 간격으로 이격시키면서(case 2-1~2-5) 모의를 수행하였다(Fig. 2a). 셋째, 저장층 내에 저투수 이질협재층의 크기와 수직 위치가 고정되어 있을 때 저투수층과 주입정의 상대적 수평거리에 따른 주입량 변화를 탐색하였다(case 3). 저투수층의 크기는 case 2와 동일하게 설정하였으며, layer 5에 위치하는 것으로 가정하였다. 저투수층의 수평적인 위치에 따라 구분되는 3가지 모델, 즉 저장층 내에 저투수층이 없는 경우(case 3-1), 주입정이 저투수층 중앙 직하부에 위치한 경우(case 3-2), 주입정 위쪽으로 저투수층이 겹치지 않도록 옆으로 이동시킨 경우(case 3-3)를 가정하고 모의를 수행하였다(Fig. 2b).

다만, 경계부 셀의 부피를 상대적으로 크게(1.0 × 10<sup>6</sup>배) 설정하여 폐쇄 경계(closed boundary)에 의한 영향을 배제하도록 하고, TOUGH2 모델 유효수자 범위(15자리)를 넘어서지 않도록 하여 정압 주입 모델링 시 발생 가능한 열린 경계(open boundary)에 의한 무한한 주입량 발생 가능성은 배제하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1. 이질협재층의 면적이 미치는 영향(case 1)

저장층 내에 주입된 이산화탄소는 물보다 밀도가 낮아 부력에 의해 위로 상승하게 되고 이로 인해 저장층 상부의 이산화탄소 포화도가 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 3a). 한편, 이산화탄소 상승구간 내에 이질협재층이 존재할 경우 저장층 상부로의 이산화탄소 거동이 제한되어 이산화탄소 포화도가 낮은 영역이 생기게 되고(Fig. 3b~g) 하부에서는 주입 종료 직후 가스 포화도가 감소하게 된다(Fig. 4a). 상부의 이산화탄소 포화도가 낮은 영역의 크기는 이질협재층의 넓이에 비례하였으며 그로 인하여 이산

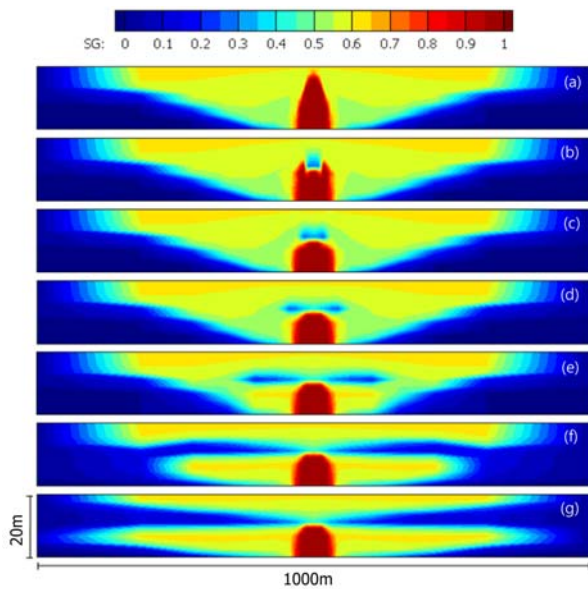


Fig. 3. Distribution of CO<sub>2</sub> gas saturation after cessation of CO<sub>2</sub> injection: (a) case 1-1, (b) case 1-2, (c) case 1-3, (d) case 1-4, (e) case 1-5, (f) case 1-6, and (g) case 1-7.

화탄소가 상부로 거동하지 못하는 만큼 저투수층 하부에서 수평방향으로의 이동이 커지는 경향이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2b~g). 이질협재층의 하부에서는 저투수층이 존재하지 않는 경우 주입정 상부에서 가장 오래 높은 포화도로 잔류하며 이질협재층의 수평 길이가 짧을수록 저투수층 직하부(layer 4)의 이산화탄소가 주입 종료 후 더 빨리 퍼져나갔다(Fig. 4a). 따라서 저투수층 면적이 가장 넓어 하부 포화도가 가장 큰 모델(case 1-7)에서 저투수층 직하부의 압력이 가장 높았으며, 저투수층 직상부(layer 6)에서는 압력이 가장 낮아, 저투수층 상·하부 사이의 압력 차이가 가장 컸다(Fig. 4b). 하지만 저투수층의 길이가 약 200 m 이하일 경우 저투수층 길이가 10 m 증가할 때마다 저투수층 직하부에서의 압력변화율이 0.07~0.34% 증가하여 면적에 의한 영향이 잘 나타났지만 그 이상인 경우에는 0.0005~0.01%로 미미하였다. 이는 저장층 온도변화에서도 비슷한 결과가 나타났다. 낮은 온도로 주입되는 이산화탄소의 분포에 따라 저장층 내 온도분포도 달라지는데 이질협재층의 크기가 클수록 온도확산이 덜 일어나며 그 중 저투수층 길이가 400, 600 m 인 경우 이산화탄소 거동이 하부에 더 많이 나타나면서 온도분포도 상·하부 고르게 나타났다(Fig. 5). 이산화탄소 총 주입량은 저투수층의 길이 약 80 m까지는 10 m당 약 1.18~1.65% 정도 감소하였지만 80~200 m에는 약 0.5%, 그 이상의 길이에서는 약 0.04~0.18%로 저투수층의 면적이 넓어질수록 주입량이 감소하였으나 감소율은 점차 줄어드는 것으로 나타났다(Fig. 4b).

#### 3.2. 주입 구간과 이질협재층의 수직거리가 미치는 영향(case 2)

앞 절에서 언급한 바와 같이 이질협재층이 없는 경우 이산화탄소 주입이 끝난 직후의 이산화탄소 포화도는 주

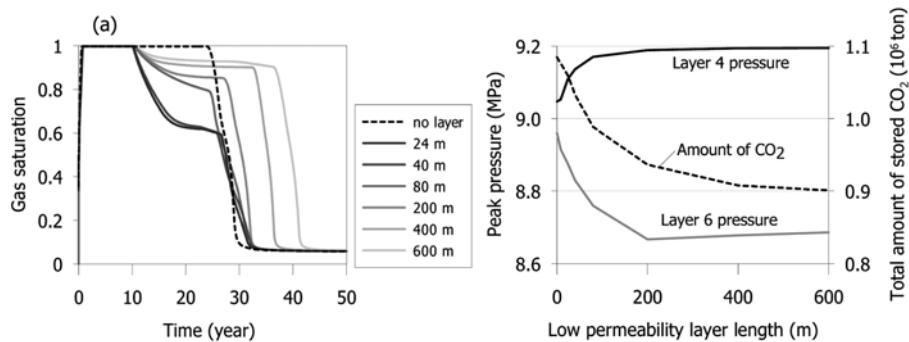


Fig. 4. Transport characteristics of the injected CO<sub>2</sub>: (a) temporal variation of gas saturation in layer 4 and (b) total amount of stored CO<sub>2</sub> and peak pressure.

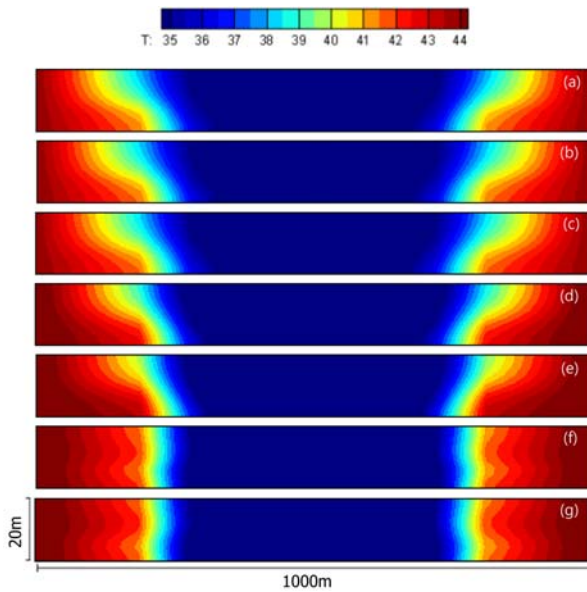


Fig. 5. Distribution of storage temperature after cessation of CO<sub>2</sub> injection: (a) case 1-1, (b) case 1-2, (c) case 1-3, (d) case 1-4, (e) case 1-5, (f) case 1-6, and (g) case 1-7.

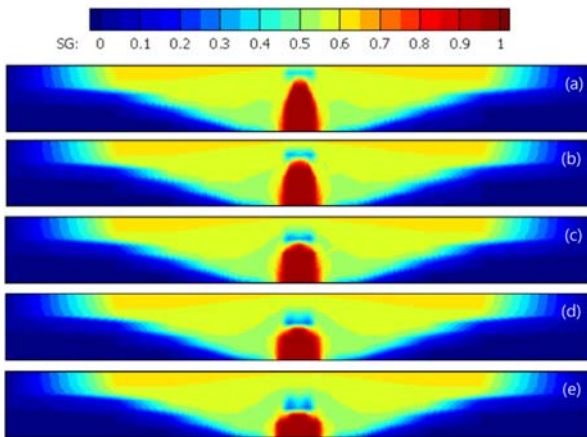


Fig. 6. Distribution of gas phase CO<sub>2</sub> after cessation of CO<sub>2</sub> injection: (a) case 2-1, (b) case 2-2, (c) case 2-3, (d) case 2-4, and (e) case 2-5.

입정 부근부터 저장층 상부까지 높게 분포한다. 하지만, 저투수층의 이질협재층이 있을 경우 이산화탄소 포화도의 분포가 크게 달라진다. Fig. 6는 저장층 내 저투수층이 존재할 경우 저투수층과 주입정과 수직 거리가 이산화탄소 포화도에 미치는 영향을 보여주는 모델 결과이다. 저투수층이 주입정과 가까울수록 저장층 하부에 포화도가 낮은 영역이 더 넓고 저장층 내 이산화탄소가 미치지 못하는 공간도 더 크게 나타났다. 결과적으로 저투수층 위치가 상부에 가까워질수록 총 저장량이 증가하였다(Fig.

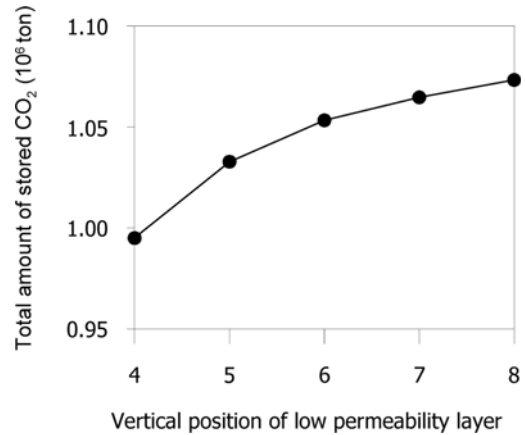


Fig. 7. Effects of vertical location of the LPL on the total amount of stored CO<sub>2</sub>.

7). 저투수층이 없는 모델에서 10년 동안 이산화탄소의 총 주입량은 약 108만 톤이다. 저투수층이 존재할 경우의 이산화탄소 주입량은 case 2-1에서 -1.1%, case 2-5에서 -8.3% 감소하여, 저투수층의 위치가 주입정의 스크린 구간에 가까울수록 주입량이 감소하는 경향이 잘 나타났다(Fig. 7).

### 3.3. 주입정과 이질협재층의 수평적 이격거리가 미치는 영향(case 3)

이질협재층의 수평 위치에 따른 저장층 내 이산화탄소 거동과 압력 변화를 비교해보았다. 먼저 저투수층이 주입정 직상부에 존재하는 경우(case 3-1) 이질협재층 직상부에 이산화탄소 거동이 미치지 못하는 영역이 존재하였으며 저장층 하부의 주입정 부근에서 이산화탄소 포화도가 저투수층이 없는 모델보다 감소하였다(Fig. 8a). 한편, 저투수층이 주입정의 상부를 막고 있지 않은 경우(case 3-2), 이산화탄소가 부력으로 상승할 때 저투수층에 의해 이산화탄소가 미치지 않는 영역은 나타나지 않았지만 저투수층이 위치한 우측부분의 포화도가 동일 심도 다른 영역에 비해 낮게 나타났다(Fig. 8b).

주입기간 동안 저투수층 직하부에서의 이산화탄소의 압력변화를 살펴보았다(Fig. 9). 주입정 직상부에 저투수층이 위치하는 모델(case 3-1)이 저투수층이 없거나(case 1-1), 수평적으로 이격되어 위치하는(case 3-2) 모델보다 이산화탄소 주입 기간 동안 이산화탄소의 압력이 상대적으로 높게 유지되었다. case 1-1과 case 3-1의 압력 차이는 주입초기 8.9만 Pa, 주입 종료 시점에서 6.7만 Pa이며, case 1-1과 case 3-2의 압력 차이는 각각 5만 Pa, 2만 Pa로 감소하였다. 즉, 주입구간 상부 저투수층의 존재 유

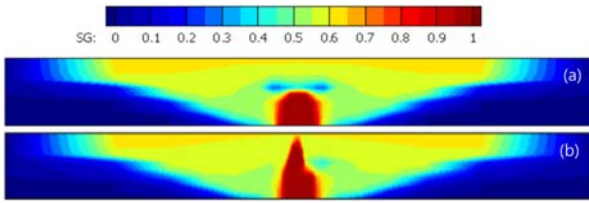


Fig. 8. Distribution of gas saturation after cessation of CO<sub>2</sub> injection: (a) case 3-1 and (c) case 3-2.

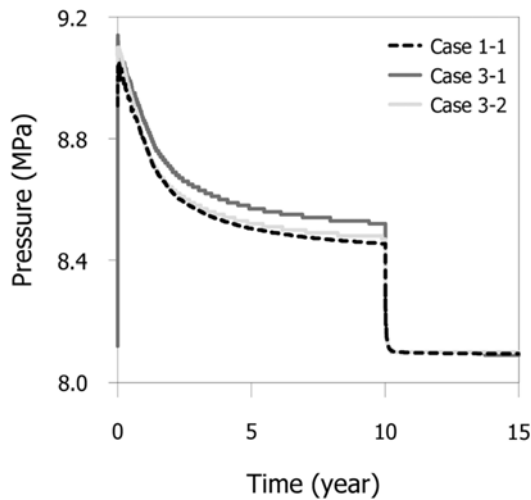


Fig. 9. Effects of LPL on pressure variation in the layer below the LPL.

무에 따라 약 3.9~4.7만 Pa 압력차이가 나타났다. 이산화탄소 총 주입량은 case 1-1에서 109만 톤이며, 이를 기준으로 case 3-1은 약 6만 톤(-5.02%), case 3-2에서는 약 2만 톤(-1.58%) 감소하는 것으로 나타났다.

**3.4. 저장층 내 압력과 이산화탄소 저장량의 상관관계**  
이질협재층이 존재하는 저장층에 이산화탄소 주입 시

이산화탄소의 저장량은 밀도와 투수율, 압력 등 여러 가지 영향을 복합적으로 받고 있지만 일정한 압력으로 고정된 주입정에서 이질협재층이 이산화탄소 주입량에 미치는 영향을 파악하기 위해 case 1~3 모델에서 이산화탄소 총 저장량과 저투수층 직하부 및 상부의 압력을 비교하였다. 이산화탄소 주입 종료 시점에서의 압력은 주입정과 가까운 이질협재층 직하부보다 저장층 최상부가 전체적으로 더 낮았다. 먼저 저장층 최상부의 압력과 이산화탄소 총 저장량과의 관계를 분석한 결과 저장층 최상부의 압력이 증가할 수록 이산화탄소의 총 저장량이 증가하였다(Fig. 10a). 저투수층의 크기, 수직 및 수평 위치 중에서 저투수층의 크기 변화가 이산화탄소 압력변화가 가장 큰 영향을 주었으며, 저투수층의 수직 위치가 압력변화에 미치는 영향이 상대적으로 가장 작았다. 이질협재층이 주입정으로부터 동일한 높이에 위치한 case 1과 case 3에서의 저투수층 직하부 압력과 총 저장량을 비교해본 결과, 저투수층 직하부의 압력이 증가할수록 이산화탄소 총 저장량이 감소하는 것으로 나타나(Fig. 10b), 저장층 최상부의 압력과는 상반된 결과를 보였다.

**4. 토 의**

본 연구에서는 저투수 이질협재층의 면적 및 이산화탄소 주입정과 상대적 위치에 따라 저장층 압력과 온도가 상이하게 나타나는 것을 확인하였으며, 그에 따른 이산화탄소 주입량도 달라지는 것을 정량적으로 분석하였다. Szulczewski et al.(2014)의 연구에 따르면 이산화탄소 주입에 의한 압력증가로 이산화탄소 저장 용량 및 거동이 제한된다. 이질협재층 직하부에서의 압력이 낮을수록 이산화탄소 총 저장량이 증가하는 것으로 나타났지만, 저장층 상부에서는 압력이 높을수록 총 저장량이 높아지는 상

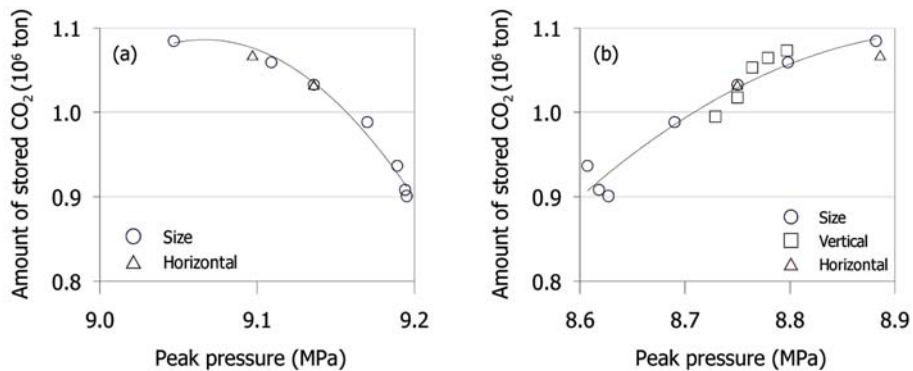


Fig. 10. Relationship between peak pressure and the amount of stored CO<sub>2</sub>: (a) the layer below the LPL and (b) the top layer.

반된 결과를 보였다(Fig. 10). 저장층 상부의 압력이 낮을수록 이산화탄소 총 저장량이 낮은 이유는 저투수층에 의해 이산화탄소가 저장층 상부로 거동하지 못할수록 하부에 잔류되는 이산화탄소량은 증가하고 상부의 이산화탄소 포화도는 낮아지기 때문이다. 즉, 더 많은 이산화탄소를 저장하기 위해서는 이산화탄소가 저투수층 직하부에 잔류되기보다는 저장층 상부로 더 많이 이동해야 한다는 것을 알 수 있다.

저투수층의 면적이 작을수록 저투수층 직하부의 압력이 낮게 나타나는데 저투수층의 크기가 약 80 m 이상일 경우 저투수층 직하부에서의 압력변화가 더 이상 나타나지 않았다(Fig. 5). 하지만 80 m 이상의 범위에서도 저투수층의 크기가 증가할수록 저투수층 상부 구간의 이산화탄소 포화도 차이가 발생하면서 총저장량이 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 저투수층이 주입구간으로부터 수직적으로 멀리 이격될수록 포화도가 높게 나타나는 저투수층 하부의 영역이 증가하여 총 저장량이 증가하였으며, 저투수층이 저장층의 상부경계와 가까워질수록 총 저장량의 증가율은 점차 감소하는 것으로 확인되었다(Fig. 7). 포항분지의 경우 저장층의 두께가 약 14 m까지 나타나는 것으로 확인되었는데(Choi et al., 2015), 본 연구에서 가정한 저장층의 두께(20 m)보다 얇아 포항분지에서 저투수층의 수직 위치에 따른 저장량 평가는 추가적으로 수행되어야 한다.

case 3은 저투수층의 크기와 수직적 위치가 고정되어 있을 때, 주입구간과의 수평적 이격이 이산화탄소 거동에 미치는 영향을 잘 보여준다. case 3-2에서는 저투수층이 주입된 이산화탄소가 저장층 상부로 거동하는 것을 완전히 차단하지 않기 때문에 하부에 잔류되는 이산화탄소보다 더 많은 양의 이산화탄소가 저장층 상부로 이동하였으며, 결과적으로 총 저장량이 case 3-1보다 크게 나타났다(Fig. 8).

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 이산화탄소 정압 주입 시 저장층 내 저투수층의 면적과 수평 및 수직적 위치에 따른 이산화탄소의 거동과 총 저장량, 저장층 내 압력 변화를 비교, 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 저장층 내 저투수 이질협재층의 면적을 증가시켰을 때 저투수층이 이산화탄소 거동을 방해하여 저장층 상부에 이산화탄소 포화도가 낮게 나타나는 영역의 크기가 나타났으며 이는 저투수층 면적과 비례한 것으로 확인되었다. 이때 상부로 이동하지 못한 이산화탄소는 저장층 하

부에 잔류되는데 저투수층의 면적이 넓을수록 잔류하는 시간과 포화도가 더 높게 나타났다. 따라서 저투수층의 면적이 증가할수록 저투수층 직 하부에서의 압력은 증가하고 이산화탄소 총 저장량은 감소하였다. 저투수층의 길이가 약 80 m 이상에서는 면적 증가에 따른 저장층 내 압력변화가 거의 없음에도 불구하고 이산화탄소 총 저장량이 감소하는 것은 저장층 상부로 이동하는 이산화탄소량이 감소하기 때문이다.

둘째, 저투수 이질협재층의 면적을 동일하게 설정하고 주입정으로부터 수직거리를 점차 증가시킬 경우 주입정 부근 이산화탄소 포화도가 높은 영역이 증가하였고 저투수층 상부 이산화탄소 거동이 나타나지 않는 공간 감소로 전체 주입량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그 증가율은 저투수층이 저장층 상부와 가까울수록 감소하지만 두께 20 m 내에서는 수직위치에 따른 주입량변화가 계속해서 일어나기 때문에 모든 위치에 따른 저장층이 꼭 고려되어야 한다.

셋째, 이질협재층의 크기와 위치가 고정되어있는 실제 분지에서는 이산화탄소 주입량을 평가하기 위해 이산화탄소 주입정과 저투수층의 상대적인 수평거리에 대한 민감도 분석이 실시되어야 한다. 저투수층 중앙 직하부에 주입정이 존재하는 것보다 저투수층 옆으로 주입정이 위치했을 때 저장량이 더 증가했다. 즉, 이산화탄소가 저장층 상부로 거동하는 구간이 저투수층에 의해 완전히 차단되지 않도록 주입정을 설치해야 더 많은 저장 공간과 총 주입량을 확보할 수 있다.

이암층이 사암, 역암층 사이에 교호되어 나타나는 분지에서 이산화탄소 저장효율을 높이기 위해서는 저투수층에 의해 이산화탄소가 하부에 잔류되는 것보다 저장층 상부로 더 많이 이동할 수 있는 위치에 주입정을 설치해야 한다. 저투수층의 면적이거나 위치가 이산화탄소 주입량에 미치는 영향은 그 크기가 작거나 주입정에 가까울 때 더 민감하게 반응하는 것을 확인하였다. 따라서 이질협재층에 대한 정확한 분석이 필요하며 그에 따른 주입량 평가가 이루어져야 한다.

## 사 사

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. 또한 2016년도 한국지질자원연구원 기본사업 “지중주입된 이산화탄소 거동 및 누출 모니터링 현장 적용 기술개발 (GP2016-20)”의 지원으로 수행하였습니다.

## References

- Bryant, S.L., Lakshminarasimhan, S., and Pope, G.A., 2006, Buoyancy-dominated multiphase flow and its impact on geological sequestration of CO<sub>2</sub>, *SPE. J.(Soc. Pet. Eng.)*, **13**(4), 1-10.
- Choi, B.Y., Park, Y.C., Shinn, Y.J., Kim, K.Y., Chae, G.T., and Kim, J.C., 2015, Preliminary results of numerical simulation in a small-scale CO<sub>2</sub> injection pilotsite: 1. Prediction of CO<sub>2</sub> plume migration, *J. Geol. Soc. Korea.*, **51**(5), 487-496.
- Egawa, K., Hong, S.K., Lee, H., Choi, T., Lee, M.K., Kang, J.G., Yoo, K.C., Kim, J.C., Lee, Y.I., Kihm, J.H., and Kim, J.M., 2009, Preliminary evaluation of geological storage of carbon dioxide in sandstones of the Sindong Group, Gyeongsang Basin (Cretaceous), *J. Geol. Soc. Korea.*, **45**(5), 463-472.
- GCCSI (Global CCS Institute), 2015, The Global Status of CCS: 2015 Summary Report, Melbourne, Australia, 18p.
- Green, C.P. and Ennis-King, J., 2010, Effect of vertical heterogeneity on long-term migration of CO<sub>2</sub> in saline formations, *Transp. Porous. Med.*, **82**(1), 31-47.
- Han, W.S., Lee, S.-Y., Lu, C., and McPherson, B. J., 2010, Effects of permeability on CO<sub>2</sub> trapping mechanisms and buoyancy-driven CO<sub>2</sub> migration in saline formations, *Water Resour. Res.*, **46**(7), 1-20.
- IPCC, 2014, Climate Change 2014: Synthesis Report Summary for Policymakers, Geneva, Switzerland, 32p.
- Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2013a, Probabilistic preliminary evaluation of geologic carbon dioxide storage capacity of the Hasandong formation, Gyeongsang Basin, Korea, *J. Geol. Soc. Korea.*, **49**(3), 373-388.
- Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2013b, Prediction and analysis of behavior of carbon dioxide injected into target geologic formations in the Bukpyeong Basin, Korea, *J. Geol. Soc. Korea.*, **49**(3), 389-406.
- Kwon, Y.K., 2015, Small-scale CO<sub>2</sub> Injection-Demonstration Project in Offshore Pohang Basin, KETEP Project Report, Kongju National University.
- Van der Meer, L.G.H., 1992, Investigations regarding the storage of carbon dioxide in aquifers in the Netherlands, *Energy Convers. and Manage.*, **33**(5-8), 611-618.
- Okwen, R.T., Stewart, M.T., and Cunningham, J.A., 2010, Analytical solution for estimating storage efficiency of geologic sequestration of CO<sub>2</sub>, *Int. J. Greenh. Gas Control.*, **4**(1), 102-107.
- Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G., 1999, TOUGH2 User's Guide, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA.
- Pruess, K. and Spycher, N., 2007, ECO2N-a fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO<sub>2</sub> storage in saline aquifers, *Energy Convers. and Manage.*, **48**(6), 1761-1770.
- Szulczewski, M.L., MacMinn, C.W., and Juanes, R., 2014, Theoretical analysis of how pressure buildup and CO<sub>2</sub> migration can both constrain storage capacity in deep saline aquifers, *Int. J. Greenh. Gas Control.*, **23**, 113-118.