

포항분지 소규모 CO₂ 주입 실증 부지에 대한 수치 모의 예비 결과: 1. CO₂ 거동 예측

최병영[‡] · 박용찬 · 신영재 · 김구영 · 채기탁 · 김정찬
한국지질자원연구원

요 약

본 연구에서는 이산화탄소 거동 예측을 위한 수치 모델링을 수행하였다. 연구 지역은 소규모 CO₂ 주입실증 부지로 포항분지 내 영일만에 위치하고 있으며, 주입 대상 지층은 연일층군 하부의 사암층이다. 모델링 결과 주입정과 관측점에서 압력은 잔류가스포화도(Sgr)가 높을수록 증가하여 저장 용량이 감소하였다. 최대주입압력을 140 bar로 가정할 경우 잔류가스포화도가 0.05인 경우 약 41,600 톤, 잔류가스포화도가 0.15인 경우 41,100 톤, 잔류가스포화도가 0.25인 경우 약 39,100 톤의 이산화탄소를 주입할 수 있었다. 주입된 이산화탄소는 주입정에서 비대칭적으로 경사면 상부로 이동하였다. 하지만 잔류가스포화도는 이산화탄소 플룸 범위에도 영향을 미치고 있었다. 즉, 잔류가스포화도가 높을수록 이산화탄소 이동 거리는 짧았으며 반면 이산화탄소 포화도는 높았다. 이는 이산화탄소와 염수의 접촉 면적을 감소시킴으로써 이산화탄소 용해량을 감소시켜 저장 안정성에 불리함을 보여주었다. 결과적으로 잔류가스포화도가 높을수록 저장 용량 및 안정성이 감소하였다. 본 연구 결과는 주입 전 예측 모델링 결과로 모델의 불확실성 감소와 히스토리 매칭 작업이 요구된다. 그럼에도 불구하고 본 연구 결과는 저장 용량 평가 및 모니터링 계획 수립에 도움이 될 것으로 판단된다.

주요어: 소규모 CO₂ 주입실증, 압력증가, 잔류가스포화도, 저장 용량

Byoung-Young Choi, Yong-Chan Park, Young-Jae Shinn, Kue-Young Kim, Gi-Tak Chae and Jeong-Chan Kim, 2015, Preliminary results of numerical simulation in a small-scale CO₂ injection pilot site: 1. Prediction of CO₂ plume migration. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 5, p. 487-496

ABSTRACT: In this study, numerical simulation was carried out to predict the behavior of injected CO₂ plume. Study site, a small-scale CO₂ injection site, is located at Yeongil Bay within the Pohang Basin. Simulation results show that pressure buildup at the injection well and the monitoring point increases in proportion to the increase of residual gas saturation (Sgr), which results in the decrease of storage capacity. Assuming the maximum injection pressure of 140 bar, storage capacity is 41,600 ton, 41,100 ton, and 39,100 ton according to Sgr = 0.05, Sgr = 0.15, and Sgr = 0.25, respectively. Injected CO₂ asymmetrically moves to the up-dip direction along the steep slope. However, Sgr also affects the extent of CO₂ plume. The migration distance of CO₂ plume from the injection well is shorter with the high Sgr value than with the low Sgr value, while CO₂ saturation (Sg) is higher with the high Sgr value. This lowers the quantity of dissolved CO₂ due to the reduction of the contact area between CO₂ and brine. Our results show that, in a given condition, high Sgr condition reduces the storage capacity and the stability of CO₂ storage. This study shows the modeling results prior to CO₂ injection. Thus it is required to reduce the uncertainty of the model and to correct the model through history matching. Nonetheless, our results will be helpful to evaluate the storage capacity and to establish the monitoring plan.

Key words: small-scale CO₂ injection, pressure buildup, residual gas saturation (Sgr), storage capacity

(Byoung-Young Choi, Yong-Chan Park, Young-Jae Shinn, Kue-Young Kim, Gi-Tak Chae and Jeong-Chan Kim, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-42-868-3261, E-mail: choiby@kigam.re.kr

1. 서론

이산화탄소 지중저장은 기후 변화에 대응하기 위한 현실적인 대용량 이산화탄소 감축 방법으로 인식되고 있다(Bachu *et al.*, 1994; Doughty *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2011). 따라서 세계적으로 2020년까지 이산화탄소 감축 목표를 위해 지중 저장 기술이 다양한 규모로 실행 혹은 시도되고 있다(IPCC, 2005). 국내에서도 정부의 이산화탄소 감축 목표를 달성하기 위해 다년간 국가 R & D가 수행되어 왔으며, 지중 저장 관련하여서는 저장 용량 평가 결과가 일부 발표되었다(Kim, Y. *et al.*, 2012; Shinn *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2014).

이산화탄소 감축 목표 달성을 위해서는 포집과 저장이 연계되어 포집된 이산화탄소를 적합한 저장소에 주입할 수 있어야 한다. 이러한 목적의 일환으로 최근에서야 이산화탄소 주입/저장 실증을 위한 “포항분지 해상 소규모 CO₂ 주입 실증 프로젝트”가 2013년 중반기에 시작되었다. 연구 지역은 포항 영일만 해안에 위치하고 있으며, 현재 부지 특성화를 위한 지구물리 탐사 및 시추공을 통한 조사가 수행되어 일부 결과가 발표되었다.

이번 연구에서는 연구부지 특성화 자료에 기반을 둔 지질모델링 결과를 참조하였으며, 이산화탄소 주입 전에 이산화탄소 거동을 예측하기 위한 수치 모델링을 수행하였다. 수치 모델링은 이산화탄소 지중 저장을 평가하는데 유용하게 사용되어 왔으며(Gaus, 2010; Xu *et al.*, 2011), 특히 TOUGH 계열 코드가 수치 모델링에 가장 많이 사용되고 있다(Pruess *et al.*, 1999; Alkan *et al.*, 2010; Doughty, 2010; Xu *et al.*, 2011; Kim, K.Y. *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2015). 국내에서도 최근 TOUGH 계열을 이용한 수치 모델 연구가 발표되고 있지만(Kim *et al.*, 2009; Kihm, 2015), 실제 지층 구조를 반영한 연구 결과는 매우 드물며 동해 북평 분지 내 이산화탄소 거동 예측(Kihm and Kim, 2013) 사례 정도가 문헌에 제시되고 있다. 본 연구에서는 연구 지역에서 취득한 탄성파 탐사 자료와 시추 자료를 종합하여 대상 지역의 지질 모델을 생성하였고, 대상 저장층의 3차원 기하학적 특성을 반영하여 수치 모델링을 수행하였다.

이번 연구의 목적은 경상북도 영일만 지역의 해상 소규모 실증 부지를 대상으로 이산화탄소 주입

모사를 통해 거동 예측을 하는데 있다. 이러한 연구 결과는 추후 저장용량 평가 및 모니터링 계획 수립에 기본 정보를 제공해 줄 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 모델 영역 및 모델 조건

연구 지역은 그림 1에서 보이는 것과 같이 포항 분지 내 영일만에 위치하고 있다. 그 동안 연구 지역에 대한 지구물리 탐사는 그림 1의 박스 영역에서 수행되었으며, 탐사 시추공 자료와 함께 통합 E&P 소프트웨어인 페트렐(Petrel: Schlumberger)을 활용하여 정적 지질모델을 구현하였다. 저장층으로 고려되는 곳 지층은 두꺼운 이암(mudstone)층 하부에 존재하는 사암(sandstone)이 풍부한 층으로 두께는 약 14 m이며, 연구 지역에서 심도 617 m에서 880 m 범위에 분포하고 있었다.

수치 모델링을 위해 14 m 두께의 저장층을 대상으로 3차원 지질 격자를 구성하였고, 저장층 심도는 주입공으로부터 동쪽으로 점진적으로 얕아지며 서쪽으로 경사져 있는 것이 특징이다. 모델 영역은 x 축 방향으로 2,643 m, y 축 방향으로 2,660 m의 영역을 대상으로 하였다. 모델 두께는 14 m로 하였으며, 1 m 간격으로 층을 구분하였다. 모델 메쉬(mesh)는 보로노이(Voronoi) 다각형 형태로 구현하였으며, 주입정 인근 최대 면적은 5 m², 최대 셀 면적은 6,500 m²로 하였다. 결과적으로 총 10,528개의 셀이 모델에 사용되었다. 보로노이 메쉬의 장점은 관정 주변 그리드 크기를 작게 설정하는 것이 용이하며, 사각형 격자를 사용하는 경우 격자의 방향으로 대상유체가 선택적으로 이동하는 문제점이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다(Mukhopadhyay *et al.*, 2012). 이산화탄소 주입을 위한 주입정의 위치는 그림 1에 나타난 바와 같으며, 이산화탄소 주입을 위한 주입정 심도는 854 m에서 859 m 사이에 위치하도록 설정하였으며, 총 14개 층 중에서 하부로부터 5개 층에 걸쳐 분포한다.

이산화탄소를 주입하기 이전 초기 상태의 온도와 압력 초기 분포를 설정하기 위해 1,000년간 모사하였고, 그 결과는 이산화탄소 주입을 위한 초기 조건으로 활용하였다. 이 때, 압력 경사는 정수압(hydrostatic)으로 가정하였고, 온도는 포항 지역의 평균지열구배

경사를(37.5°C: Song *et al.*, 2010) 이용하였다. 모델링 결과는 이산화탄소 주입을 위한 초기 조건으로 활용하였다.

모델의 경계조건은 모델 상, 하, 측면 모두 비유동성 경계(no flow boundary)로 설정하였다. 경계 조건은 모델 면적, 온도/압력 조건, 지구화학 조건 등과 함께 이산화탄소 거동을 예측하는데 영향을 미치게 된다. 왜냐하면 비유동성 경계 조건에서는 유체 흐름에 제한되어 압력 증가(pressure buildup)가 흔히 발생하기 때문이다. 따라서 이 경우 이산화탄소 주입량은 과소평가될 수도 있다. 하지만 본 연구에서는 경계 조건이 아직 명확하지 않기 때문에 보수적인 결과를 위해 비유동성 경계 조건을 설정하였다.

이산화탄소 주입은 약 49,000 톤이 5.5년간 주입되었다. 주입률은 초기 0.5년간은 0.1 kg/s로, 나머지 5년간은 0.3 kg/s로 설정하였다. 이는 주입 초기 높은 주입률은 관정에서 압력을 급격히 증가시키기

때문에 이를 방지하기 위해 단계적으로 주입을 적용하였다. 주입 종료 후에는 100년간 이산화탄소 거동을 모사하였다. 본 연구에서는 이산화탄소 주입에 의해 온도가 변하지 않은 등온(isothermal) 조건을 가정하였다. 또한 저장층의 염질량분율(salt mass fraction)은 약 0.03으로 가정하였다.

2.2 수치 모델 및 수리지질학적 조건

본 연구에 사용된 수치 모델은 TOUGH2 코드(Pruess, 1991)에 기반한 Petrasim (Thunderhead Engineering)을 이용하여 모델 전/후 처리를 수행하였으며, 이산화탄소 거동을 모사하기 위해 ECO2N 모듈(Pruess and Spycher, 2007)을 사용하였다. 이 모듈은 주어진 온도(10-110°C), 압력(<600 bar), 염도(halite saturation) 범위에서 이산화탄소 거동을 모사할 수 있다.

본 모델에서 투과율(permeability)과 공극률(porosity)은 저장층 탐사 시추공에서 획득된 코어 시료에서 측

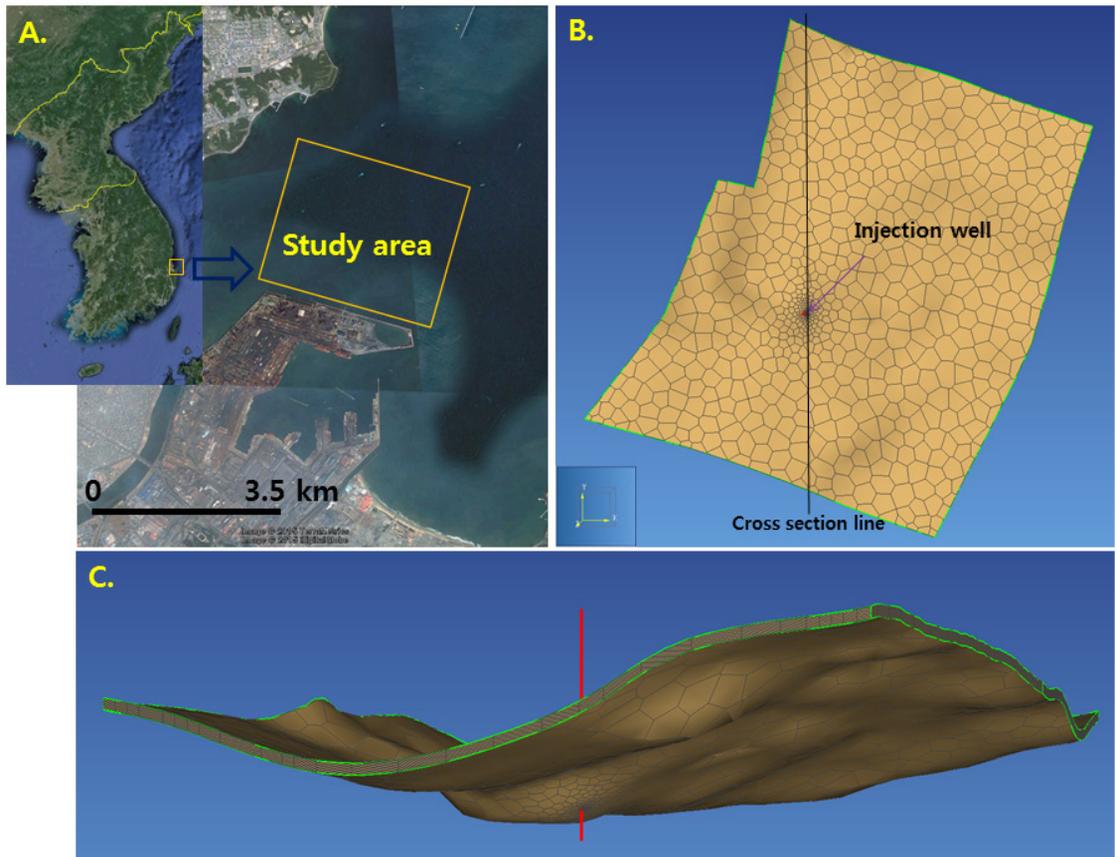


Fig. 1. A. study area, B. model geometry(plane view), C. model geometry (side view).

Table 1. Hydrological parameters used in the simulation.

Parameters	Values
Pore compressibility (1/Pa)	4.5E-10
Relative permeability (van Genuchten-Mualem)	
m, exponent	0.457
Slr, residual water saturation	0.3
Sgr, residual gas saturation	0.05, 0.15, 0.25
Capillary pressure (van Genuchten)	
m, exponent	0.457
Slr, residual water saturation	0.0
P0, strength coefficient (kPa)	19.61

정된 값의 평균을 사용하였다. 평균 수평 방향 투과율은 $4.02 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 으로 가정하였고, 수직 방향 투과율은 수평 방향 투과율의 1/10로 가정하였다. 평균 공극률은 0.245이었다. 예외적으로 관정에서 주입이 되는 5 m 구간은 공극률을 0.99로 설정하였다.

상대 투과율(relative permeability) 및 모세관 압력(capillary pressure) 함수는 van Genuchten-Mualem (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) 함수와 van Genuchten (van Genuchten, 1980) 함수가 각각 사용되었다. 이들 함수에 사용된 공극수에 대한 잔류포화도(residual water saturation, Slr)와 초임계상 CO₂에 대한 잔류포화도(residual gas saturation, Sgr)에 대해서는 현재 실측값이 부재하기 때문에 그동안 지중 저장 연구에서 사용된 값들을 참고하여 사용하였다(Xu *et al.*, 2005; Okwen *et al.*, 2011). 이들 값은 표 1에 제시하였다. 다만 일본의 나가오카(Nagaoka) CO₂ 주입 실증 프로젝트에서 모델링을 수행한 Mito *et al.* (2013)과 유사하게 초임계상 CO₂의 잔류포화도는 0.05를 기본 사례로 하였고, 값을 0.15, 0.25로 증가시키면서 지중 저장에 미치는 영향을 확인하였다.

이산화탄소 주입에 의해 관정 인근에서는 물이 증발하여(dry-out) 염(salt) 침전이 발생할 수 있으며, 이는 투과율을 변화시키게 된다. 즉, 소량의 염 침전이 상당한 투과율 감소를 야기할 수 있다. 본 모델에서는 이를 모사하기 위해 “tube-in-series” 모델을 적용하였다(Verma and Pruess, 1988). 이 모델은 중요한 두 개의 파라미터가 이용되는데 하나는 다른 반경을 갖는 공극들의 분획길이(fractional length)인 Γ 와 투과율이 0이 될 때 공극률의 비율인 Φ_r 로 이들 값은 각각 0.8로 설정하였다(Pruess, 2005).

3. 결과 및 토의

3.1 압력 변화

3.1.1 주입정에서 압력 변화

주입정에서 압력 변화를 확인하기 위해 가장 하부의 셀을 선택하여 시간의 경과에 따른 압력의 변화를 확인하였다. 본 연구에서는 실제 관정 크기보다 큰 그리드가 사용되었고, 또한 TOUGH2는 관정을 주입하는 셀로 인식할 뿐 관정 함수가 포함되어 있지는 않다. 따라서 TOUGH2 결과는 실제 발생할 수 있는 압력 변화보다 과소평가될 수 있다. 하지만 모사 결과는 연구 초기단계에서 요구되는 기본적인 정보를 제공하고 경향성을 확인하는 측면에서는 충분하다고 판단된다.

그림 2에서 보이는 것과 같이 주입 시작과 동시에 주입정에서 압력은 급격히 상승하여 Sgr = 0.25인 경우 약 117 bar까지 증가한다. 그리고 그림에서 화살표가 지시하는 것처럼 압력이 낮아진 후 0.1 kg/s로 주입하는 0.5년간 일정한 값을 보여준다. 주입 초기 급격한 압력 상승 원인은 이산화탄소 주입 초기에는 비습윤상(non-wetting phase)인 이산화탄소가 주변 염수를 밀어내야하며, 이때 이산화탄소가 염수를 대체하기 위해서는 공극으로 들어갈 수 있는 임계 압력(threshold capillary pressure)이 요구되는데 이에 의해 압력이 상승하는 것으로 보고되었다(Vilarrasa *et al.*, 2010; Müller, 2011). 하지만 염수가 이산화탄소로 대체되고 모세관대(capillary fringe)가 형성되고 나면, 이산화탄소 점성도가 염수보다 낮기 때문에 이산화탄소가 쉽게 이동할 수 있어 압력 감소가 발생하는 것으로 보고되었다(Vilarrasa *et*

al., 2010). 이 기간 후에 0.3 kg/s로 주입하는 경우 많은 양의 주입에 의한 압력 상승과 비유동성 경계

조건에 의해 압력이 지속적으로 상승하고 있다.

또한 전체적인 압력은 잔류가스포화도가 높을수록

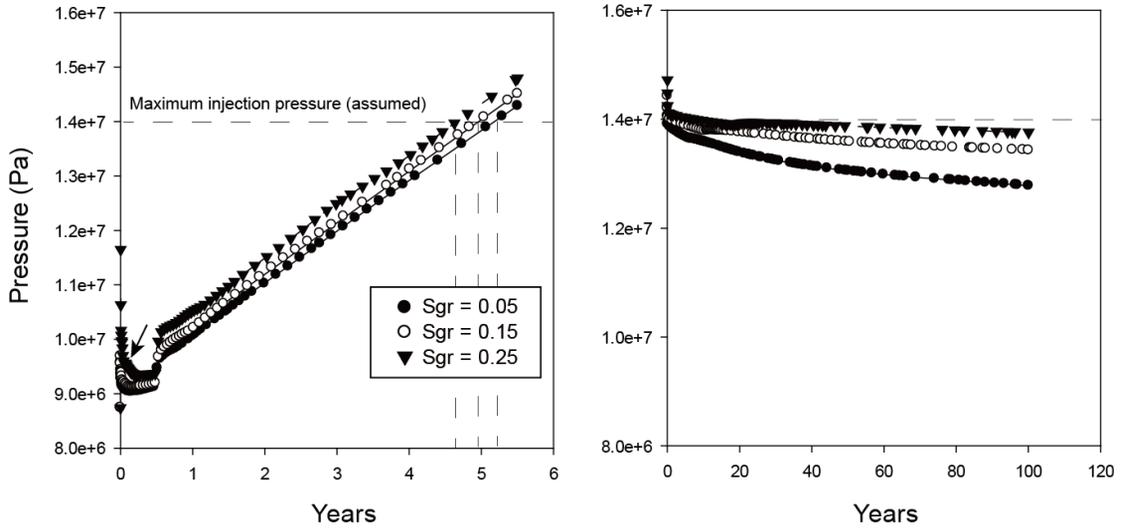


Fig. 2. Temporal pressure variation in the injection well according to residual gas saturation (Sgr).

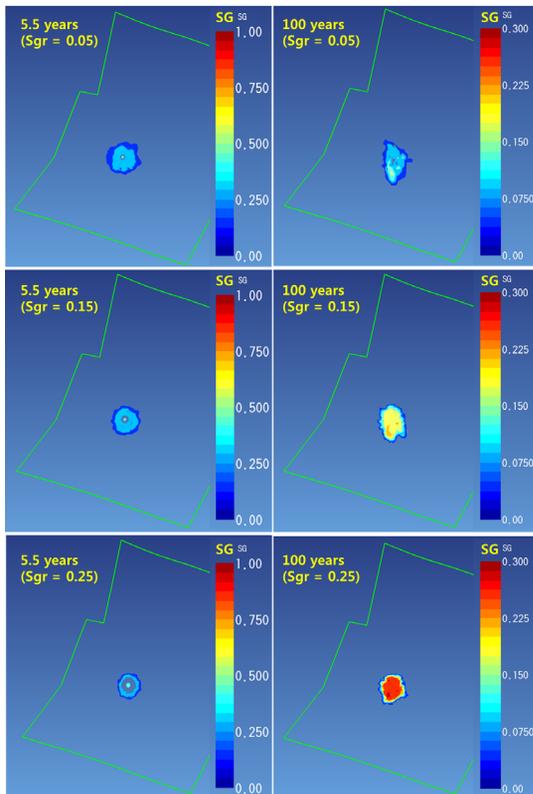


Fig. 3. Temporal distribution of CO₂ gas saturation (SG) according to residual gas saturation (Sgr).

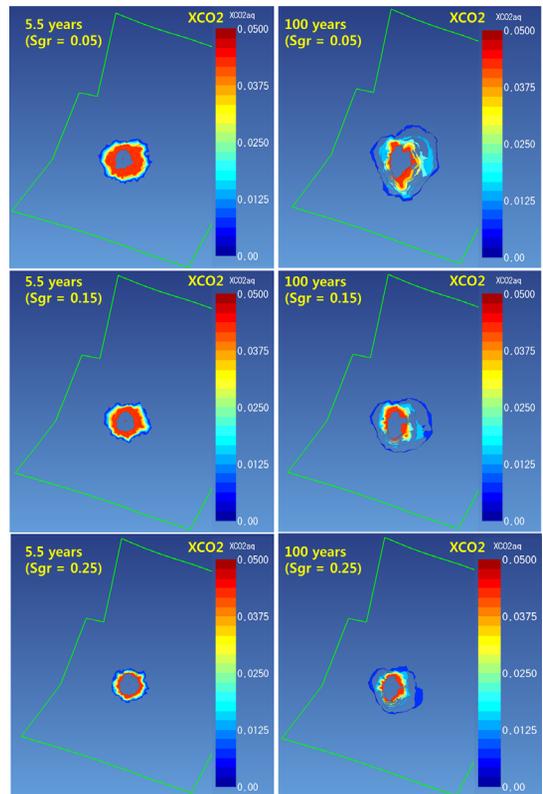


Fig. 4. Temporal distribution of mol fraction of aqueous CO₂ (XCO₂) according to residual gas saturation (Sgr).

압력이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다(그림 2). 이는 잔류가스포화도가 0.25일 경우, 이산화탄소가 이동

하기 위해서는 0.25이상의 이산화탄소 포화도가 필요하기 때문에 잔류가스포화도가 이보다 낮은 경우

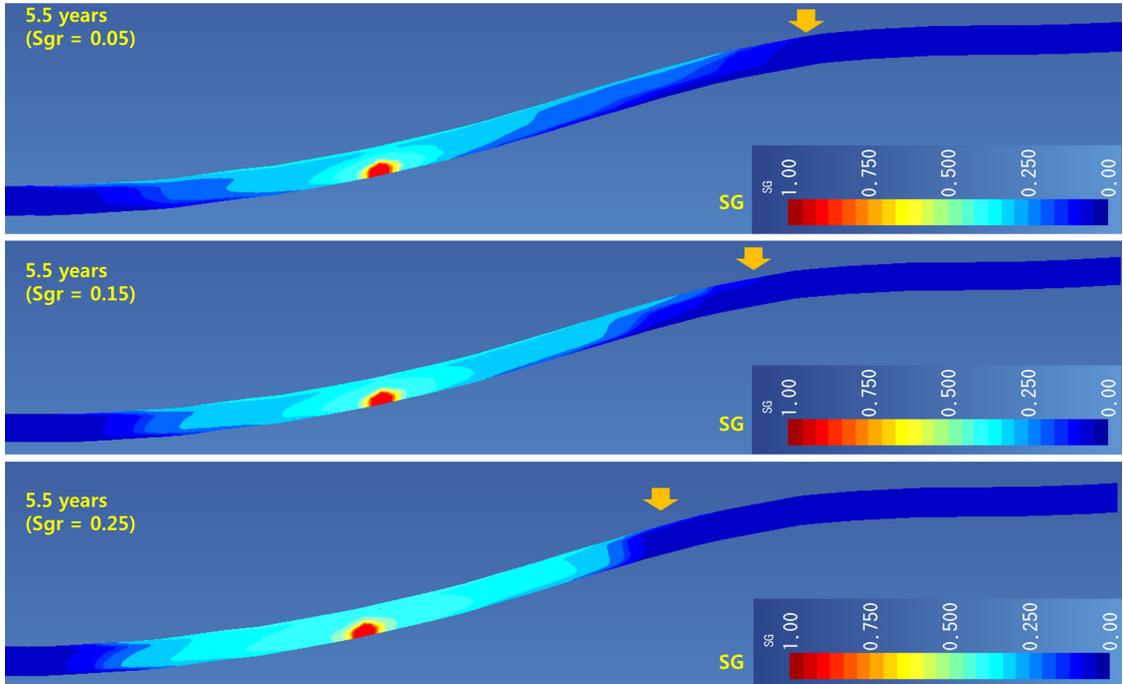


Fig. 5. Cross section of CO₂ gas saturation (SG) according to residual gas saturation (Sgr) in 5.5 years after CO₂ injection.

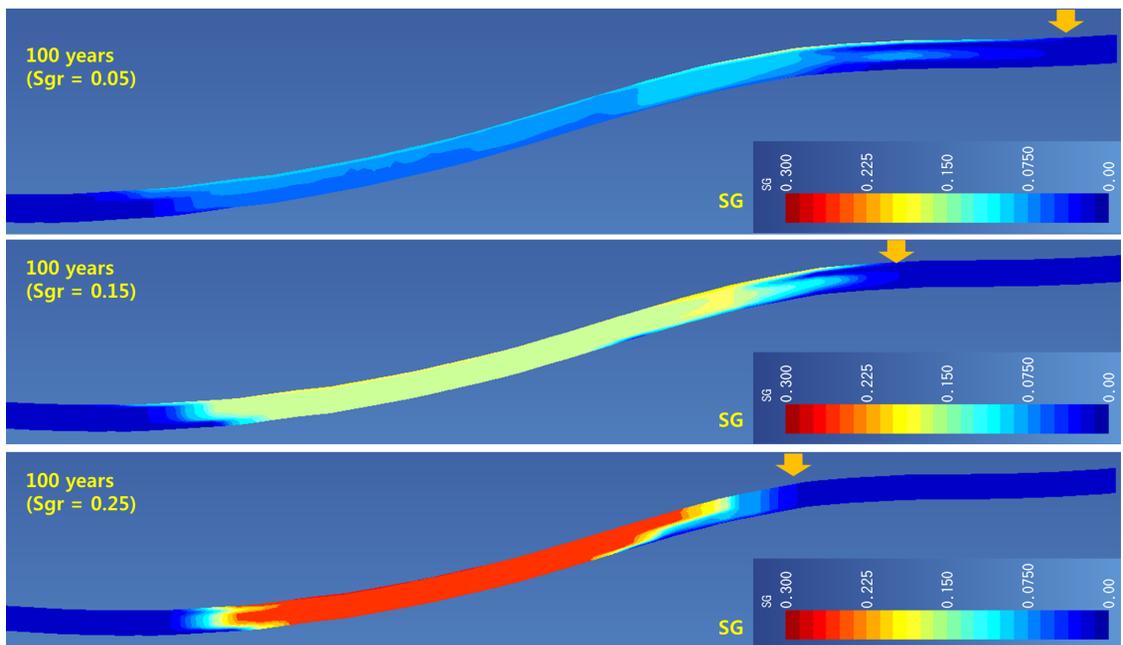


Fig. 6. Cross section of CO₂ gas saturation (SG) according to residual gas saturation (Sgr) in 100 years after injection stop.

보다 많은 이산화탄소가 주입되어 모델 상에서 압력이 증가하게 된다(Oldenburg and Doughty, 2011).

주입 종료 후 100년간 모사한 결과에서는 주입 종료와 함께 압력이 감소하고 있다. 압력 감소는 잔류 가스포화도가 낮을수록 빠르게 나타나고 있으며, 잔류가스포화도가 높을수록 압력 감소는 매우 완만하게 나타나고 있다. 본 모사에서는 이산화탄소의 주입량이 동일하고 비유동성 경계를 갖는 폐쇄계(closed system)이기 때문에 이산화탄소 압력의 감소는 염수에 용해되는 것으로 밖에는 설명될 수 없다. 이는 추후 이산화탄소 저장 기작에서 확인할 수 있는 것처럼(그림 7), 잔류가스포화도가 낮을수록 용존된 이산화탄소가 많으며, 잔류가스포화도가 높으면 그 반대 경향을 보여주는 것으로 보아 주입 종료 후 압력 감소 차이는 이산화탄소 용해량에 의해 결정되는 것으로 보인다.

잔류가스포화도에 따른 최대주입량을 평가하기 위해 최대주입압력(maximum bottom-hole pressure)을 14 MPa(약 140 bar)로 가정하였다. 그림 2에서 보이는 것과 같이 잔류가스포화도가 높을수록 최대주입압력에 일찍 도달하는 것을 볼 수 있다. 최대주입압력에 도달할 때까지 주입된 이산화탄소는 잔류가스포화도가 0.05일 때 약 41,600 톤, 잔류가스포화도가 0.15일 때 약 41,100 톤, 잔류가스포화도가 0.25일 때 약 39,100 톤 정도였다. 따라서 잔류가스포화도가 높을수록 주입량은 압력 증가에 의해 감소하였다.

3.2 이산화탄소 플룸 이동

이산화탄소 플룸 변화를 확인하기 위해 평면(그림 3, 4)과 단면(그림 5, 6)을 제시하였다. 우선 이산

화탄소 포화도를 나타내는 그림 3에서 주입기간(5.5년)에 이산화탄소 플룸 범위는 잔류가스포화도가 낮을수록 넓고, 잔류가스포화도가 높을수록 좁게 나타나고 있다. 100년 후에도 유사한 경향을 보여주지만 특징적으로 잔류가스포화도가 높을수록 이산화탄소 포화도가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 용해된 이산화탄소 몰분율(mol fraction)을 나타내는 그림 4에서도 유사하게 잔류가스포화도에 따라 플룸 범위가 결정되고 있다.

이는 단면 그림에서도 좀 더 뚜렷이 확인할 수 있다. 주입기간(5.5년)의 이산화탄소 가스 포화도 단면도를 나타내는 그림 5에서 보이는 것과 같이 이산화탄소는 경사면을 따라 비대칭적으로 이동하고 있다. 즉 경사면을 따라 이동하는 것을 볼 수 있다. 하지만 잔류가스포화도가 낮을수록 플룸 끝부분(화살표) 위치가 주입정에서 멀게 위치하고 있고, 잔류가스포화도가 높을수록 주입정에서 가까이 위치하고 있음을 볼 수 있다. 100년 후에는 부력에 의해 이산화탄소는 경사 상부 쪽으로 더 이동하지만, 플룸의 범위는 주입기간과 마찬가지로 잔류가스포화도에 결정되고 있다(그림 6). 또한 잔류가스포화도가 높은 경우 플룸 범위는 좁지만 이산화탄소 포화도는 높음을 알 수 있다. 이는 이산화탄소 플룸이 좁아 대수층의 염수와 혼합되어 용해될 수 있는 접촉 면적을 감소시킴으로서 용해되는 이산화탄소 양이 상대적으로 적어질 수 있으며(Alkan *et al.*, 2010), 이러한 결과는 저장 기작에서(그림 7)에서 확인되었다.

3.3 저장 기작 변화

본 모사에서는 물-암석 반응을 고려하지 않았기

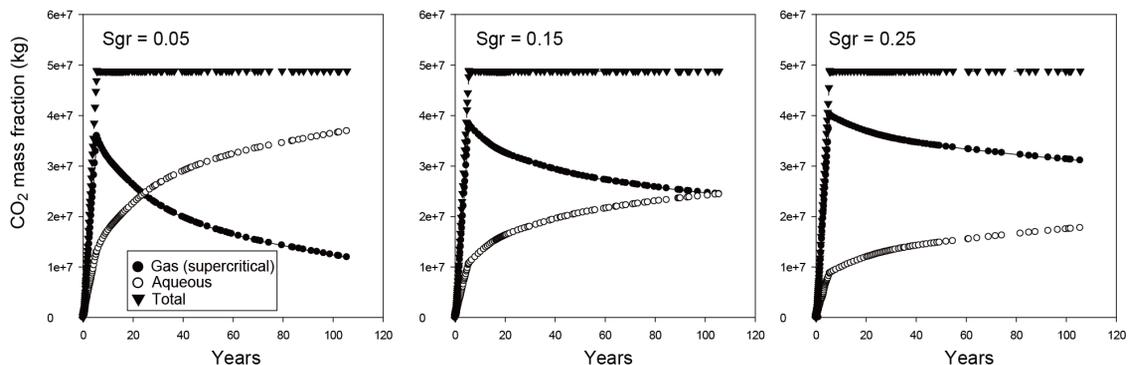


Fig. 7. Variation of CO₂ storage mechanism according to residual gas saturation (Sgr) during simulation time.

때문에 주입된 이산화탄소의 저장 기작은 가스(초임계)상과 용해상으로서의 저장으로 구분될 수 있다. 시간에 따른 저장 기작 변화는 그림 7에 제시하였다. 그림에서 보이는 것과 같이 주입 기간에는 가스상이 우세하다가 주입 종료와 함께 가스상이 감소하고 용해상의 증가가 우세하게 나타난다. 하지만 잔류가스 포화도에 따라 뚜렷한 차이가 보이는데 잔류가스 포화도가 낮을수록 가스상이 급격히 감소하고 용해상이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 잔류가스포화도가 높은 경우에는 가스상이 완만히 감소하여 100년 후에도 가스상이 우세하게 존재하고 있다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 염수와 접촉 면적이 적어 용해가 어렵기 때문인 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 포항분지 영일만 내에 위치한 소규모 CO₂ 주입 실증 부지에 대해 이산화탄소 거동을 예측하기 위해 이산화탄소 주입 모사를 수행하였다. 수치 모델링 결과 주입정과 관측점에서 압력은 이산화탄소 주입에 따라 지속적으로 증가한 후 주입 종료와 함께 감소하였다. 하지만 잔류가스포화도가 높을수록 압력 증가는 상대적으로 높게 나타나 주입 용량이 감소하였다. 또한 잔류가스포화도는 이산화탄소 플룸 범위에도 영향을 미치고 있었다. 이산화탄소는 경사면을 따라 비대칭적으로 이동하였다. 하지만 잔류가스포화도가 높을수록 플룸이 도달하는 범위가 주입정에서 가까운 반면 이산화탄소 포화도는 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 이산화탄소 용해량을 감소시켜 저장 기작에도 영향을 미치고 있었다. 잔류가스포화도가 높을수록 이산화탄소 가스상이 장기간 우세하게 나타났으며, 잔류가스포화도가 낮을수록 이산화탄소 용해상이 우세하게 나타났다. 결과적으로 본 연구의 주어진 조건에서는 잔류가스포화도가 높을수록 압력 증가에 의한 저장 용량 감소와 가스상이 우세하게 존재함으로써 안정성에 불리한 조건을 보여주고 있었다. 본 연구는 이산화탄소 주입 전 예측 모델링 결과로 모델 결과의 불확실성에 미치는 요소(투과율, 상대투과율, 모델 면적, 온도/압력 조건, 경계 조건 등)들에 대한 연구 및 well testing 실시와 이에 대한 히스토리 매칭(history matching) 작업이 필요하다. 그럼에도 불구하고 본 연구결

과는 저장 용량 평가 및 모니터링 계획 수립에 기본 정보를 제공해줄 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 주관 하에 한국에너지기술평가원의 지원에 의한 “포항분지 해상 소규모 CO₂ 주입실증 프로젝트(과제번호: 20132010201760)” 과제의 연구 결과 중 일부를 밝힙니다. 또한 한국 지질자원연구원에서 수행중인 주요사업 “지중주입 이산화탄소 거동 및 누출 모니터링 현장 적용 기술 개발”의 일부 지원으로 수행되었습니다. 탐사 시추공 지질 자료를 제공해 주신 공주대학교 권이균 교수님, 동아대학교 이대성 교수님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Alkan, H., Cinar, Y. and Ülker, E.B., 2010, Impact of capillary pressure, salinity, and in situ conditions on CO₂ injection into saline aquifer. *Transport in and Porous Media*, 84, 799-819.
- Bachu, S., Gunter, W.D. and Perkins, E.H., 1994, Aquifer disposal of CO₂: hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Conversion and Management*, 35(4), 269-279.
- 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, 49-76.
- Doughty, C., Pruess, K., Benson, S.M. and Freifield, B.M., 2004, Hydrological and geochemical monitoring for a CO₂ sequestration Pilot in a Brine Formation. Technical Report LBNL-55104. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- Gaus, I., 2010, Role and impact of CO₂-rock interactions during CO₂ storage in sedimentary rocks. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 73-89.
- IPCC, 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davison, H.C. de Coninck, M. Loos, and L.A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.
- Kihm, J.H. and Kim, J.M., 2013, Prediction and analysis

- of behavior of carbon dioxide injected into target geologic formations in the Bukpyeong Basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(3), 389-406 (in Korea with English abstract).
- Kihm, J.H., 2015, Evaluation of operation design variables for geologic injection of carbon dioxide using numerical modeling. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(2), 221-233 (in Korea with English abstract).
- Kim, K.Y., Kim, T., Kim, J.C. and Han, W.S., 2009, Numerical study on pressure variation due to subsurface CO₂ injection. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(5), 435-448 (in Korea with English abstract).
- Kim, K.Y., Han, W.S., Oh, J., Kim, T. and Kim, J.C., 2012, Characteristics of salt-precipitation and the associated pressure build-up during CO₂ storage in saline aquifers. *Transport in Porous Media*, 92, 397-418.
- Kim, Y., Lee, K., Jo, S., Kim, M., Kim, J.S. and Park, M.h., 2012, A preliminary evaluation on CO₂ storage capacity of the southwestern part of Ulleung Basin, offshore, East Sea. *Economic and Environmental Geology*, 45(1), 41-48 (in Korea with English abstract).
- Lee, G.H., Lee, B., Kim, H.J., Lee, K. and Park, M.h., 2014, The geological CO₂ storage capacity of the Jeju Basin, offshore southern Korea, estimated using the storage efficiency. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 23, 22-29.
- Mito, S.M., Xue, Z. and Sato, T., 2013, Effect of formation water composition on predicting CO₂ behavior: A case study at the Nagaoka post-injection monitoring site. *Applied Geochemistry* 30, 33-40.
- Mualem, Y.A., 1976, A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12, 513-522.
- Mukhopadhyay, S., Doughty, C., Bacon, D., Bacci, G., Govindan, R., Shi, J.Q., Gasda, S., Ramanathan, R., Nicot, J.P., Hosseini, S. and Birkholzer, J.T., 2012, Preliminary model-comparison results from the Sim-SEQ project using TOUGH2, STOMP, ECLIPS, and VESA approach. *Proceeding TOUGH Symposium 2012*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 17-19.
- Müller, N., 2011, Supercritical CO₂-brine relative permeability experiments in reservoir rocks-literature review and recommendations. *Transport in Porous Media*, 87, 367-383.
- Okwen, R.T., Stewart, M.T. and Cunningham, J.A., 2011, Temporal variations in near-wellbore pressures during CO₂ injection in saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5, 1140-1148.
- Oldenburg, C.M. and Doughty, C., 2011, Injection, flow, and mixing of CO₂ in porous media with residual gas. *Transport in Porous Media*, 90, 201-218.
- Pruess, K., 1991, TOUGH2-a general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow. Report-29400, Lawrence Berkeley National Laboratory, CA.
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., 1999, TOUGH2 User's Guide, Version 2. LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, CA.
- Pruess, K., 2005, ECO2N: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO₂. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
- Pruess, K. and Spycher, N., 2007, ECO2N-a fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO₂ storage in saline aquifers. *Energy Conversion and Management* 48, 1761-1770.
- Shinn, Y.J., Yoo, D.G., Hwang, S., Park, Y.C. and Huh, D.G., 2012, A preliminary screening of CO₂ geological storage in Ulleung Basin, Korea. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, 49(1), 47-58 (in Korea with English abstract).
- Song, Y., Kim, H.C. and Lee, T.J., 2010, Geothermal development in Korea: Country Update 2005-2009. *World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, April 25-29, 241 p.
- van Genuchten, M.T.H., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.
- Verma, A. and Pruess, K., 1988, Thermohydrological conditions and silica redistribution near high-level nuclear wastes emplaced in saturated geological formations. *Journal of Geophysical Research* 93, 1159-1173.
- Vilarrasa, V., Bolster, D., Olivella, S. and Carrera, J., 2010, Coupled hydrodynamical modeling of CO₂ sequestration in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 910-919.
- Xu, T., Apps, J.A. and Pruess, K., 2005, Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system. *Chemical Geology*, 217, 295-318.

Xu, T., Spycher, N., Sonnenthal, E., Zhang, G., Zheng, L. and Pruess, K., 2011, TOUGHREACT version 2.0: a simulator for subsurface reactive transport under non-isothermal multiphase flow conditions. *Computers & Geosciences*, 37, 763-774.

Yu, Z., Liu, L., Liu, K., Yang, S. and Yang, Y., 2015, Petrological characterization and reactive transport simulation of a high-water-cut oil reservoir in the

Southern Songliao Basin, Eastern China for CO₂ sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37, 191-212.

Received : July 13, 2015

Revised : August 25, 2015

Accepted : September 7, 2015