



## 닫힌 시스템에서의 CO<sub>2</sub> 주입에 따른 저장층 내 공극압력 변화와 그 기작

김태희

한국지질자원연구원 석유해저연구본부 CO<sub>2</sub>지중저장연구단

### 요 약

본 연구에서는 크기가 제한적인 저장층에 20년 내외의 기간 동안 CO<sub>2</sub> 주입될 경우, 공극 내 압력 변화는 어떤 양상으로 이루어 지며 압력 변화에 영향을 주는 핵심적인 요인은 무엇인가에 대해 수치모델링을 통해 검토하고자 하였다. 이를 위해 반지름 4~10 km 두께 50 m의 닫힌 경계조건을 가지는 원통형 저장층을 가정, 저장층의 크기, 압축률에 대한 민감도를 살펴 보았다. 다상 유체에 의한 영향을 살펴보기 위하여 물과 CO<sub>2</sub> 주입의 경우를 각각 모의하고, 그 결과를 살펴 보았다. 물을 주입하는 경우 투과율에 의한 압력 변화는 거의 모든 경우에 대해 1개월 이내의 기간 동안만 지속되었다. 짧게는 0.5년에서 길게는 약 2년 내외의 시간 경과 후 압력 변화는 시간에 대해 선형적으로 증가하며 이 증가율은 겉보기 압축률과 전체 공극 크기에 의해 규정됨을 확인하였다. CO<sub>2</sub>를 주입하는 경우 역시 기본적인 변화 양상은 동일하나, 이산화탄소의 공간적 확산에 따른 포화도의 변화와 유체의 평균 점성도의 변화에 의한 압력 전파가 달라짐을 확인할 수 있었다.

**주요어:** 닫힌 경계조건, 압력변화, 압축률, 민감도, 유체 점성도

**Taehee Kim, 2019, Numerical study on the mechanism of pore pressure changes due to the CO<sub>2</sub> injection in the finite reservoir. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 4, p. 445-460**

**ABSTRACT:** In this study, it was investigated with numerical simulations which factors is more important on the temporal change of the pore pressure, in the case of the long-term CO<sub>2</sub> injection, for about 20 years, into the finite reservoir. For this purpose, the sensitivity studies on the formation size and the compressibility were applied, assuming a storage formation having a cylindrical boundary radius of 4 to 10 km and a thickness of 50 m. To clearly investigate the effect of multi-phase flow, changes of pore pressures in the designed reservoir, with the injection of water and CO<sub>2</sub>, were numerically simulated respectively. In the case of the water injection, the pressure change due to the permeability is effective only for a period of 1 month or less in most cases, and then pore pressures linearly increase over the elapsed time. And the slope of pressure increase over time is controlled by the bulk compressibility and the total pore volume. In the case of the CO<sub>2</sub> injection, the overall changes in pressure is quite similar. But the change of gas saturations and fluid viscosities due to the spatial migration of CO<sub>2</sub> made noticeable changes in the pressure propagation.

**Key words:** closed boundary condition, pressure change, compressibility, sensitivity, fluid viscosity

(Taehee Kim, Center for CO<sub>2</sub> Geological Storage, Petroleum & Marine Division, Korea institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

### 1. 개 요

2017년 포항 지진 발생과 그 원인에 대한 조사 결과(Lee *et al.*, 2019) 발표 이후, 그 결과 검증에 대한 다양한 논의를 떠나 국내에서도 지하 유체 주입에 따른 지진 발생 가능성에 관한 관심이 매우 높아져

있는 상태이다. 물론 이러한 관심 혹은 걱정이 다소 과도할 수도 있으나, 지하 유체 주입에 따른 단층의 재활성화(Mildren *et al.*, 2005), 유발 혹은 촉발에 의한 지진 발생 가능성(Healy *et al.*, 1968; Ellsworth, 2014)이 있다는 것은 여러 문헌을 통해 이미 보고된 바 있다. 그리고 이산화탄소 지중저장(CO<sub>2</sub> geological

‡ Corresponding author: +82-42-868-3070, E-mail: [katzura@kigam.re.kr](mailto:katzura@kigam.re.kr)

storage)이라는 개념 역시 본질적으로 지하 지층에 유체를 주입한다는 점에서 유사한 문제가 발생할 수 있다는 가능성을 배제할 수는 없다. 노르웨이, 호주 등 국외에서는 중소규모 현장 실증 실험을 진행하면서 이에 관한 모니터링 작업을 지속적으로 수행하고 있거나 수행하였다(Jenkins *et al.*, 2012; Williams *et al.*, 2018).

일반적으로 지하로의 유체 주입에 의해 일어날 수 있는 단층의 재활성화나 미소지진의 발생은 지질 구조와 주입된 유체에 의한 공극 유체압 상승이라는 2가지 요소에 의해 규정된다(Ellsworth, 2014). 이 중 지질 구조는 정적으로 규정된 요인으로 인위적으로 재설정할 수 없는 부분이나, 주입된 유체에 의한 공극 유체압의 상승은 제약 조건이 따르기는 하지만 어느 정도는 제어할 수 있는 부분이다. 따라서 최근 이산화탄소 지중 저장과 관련하여 저장층 내에서의 압력제어(pressure management)에 관한 논의들이 널리 진행되고 있기도 하다(Liu *et al.*, 2013; Birkholzer *et al.*, 2015; Cihan *et al.*, 2015; Buscheck *et al.*, 2016a, 2016b; Bosshart *et al.*, 2018; Kolster *et al.*, 2018). 하지만, 이산화탄소 지중 저장 과정에서 저장층 내 압력제어 방법의 도입은 이산화탄소 저장 비용의 상승을 유발할 수 있으며, 이 때문에 압력제어 방법을 도입하더라도 그 효율성을 고려하지 않을 수 없다. 그리고 그 효율성의 제고를 위해서는 유체 주입에 따른 압력 상승 기작을 충분히 이해할 필요가 있다.

앞서 잠시 언급한 바와 같이 지층으로의 유체 주입에 의한 공극 유체압 상승에는 지질 구조 등 정적인 부분이 중요한 규정적 요인으로 작용하게 된다. 특히 저장층의 경계가 단층 점토를 함유한 구조대나 기반암에 의해 구획되는 경우 공극 내 유체 압력 변화에 대해 매우 지배적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 선정된 혹은 유력한 저장 후보층을 대상으로 이산화탄소 혹은 유체의 주입에 관해 설계할 때, 그 경계의 특성을 규정짓는 것이 매우 중요하다. 따라서 국내에서도 이산화탄소 지중 저장에 관한 실증 사업을 검토하기에 앞서 국내 퇴적분지의 지질학적 특성에 대해 구체적인 검토작업이 선행되어야 한다.

현재까지 국내에서 상업용 규모의 이산화탄소 지중 저장 후보지로 검토되고 있는 지역은 동해 가스전 인근과 서해 군산분지 등이 주로 거론된다(Kwon and Shinn, 2018). 그리고, 현재 해당 지역에서 저장소 후

보로 거론되고 있는 지층들은 대부분 단층이나 기반암 혹은 저투성 지층에 의해 수평적으로 경계지워지고 있다(Park, K.-S. *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2012; Park, Y.J. *et al.*, 2015; Shinn *et al.*, 2010; Shinn, 2015; Song *et al.*, 2015; Lee, C. *et al.*, 2016; Lee, H. *et al.*, 2017). 이러한 지질학적 특징은 주입된 이산화탄소의 누출 방지라는 면에서 큰 장점이 될 수 있으나, 20~30년에 이르는 장기적인 유체 주입이 필요한 이산화탄소 지중저장사업에서는 광역적인 유체 압력 상승이라는 측면에서는 오히려 단점이 될 수도 있다.

국내에서는 일부 온천 지역을 제외하면 10년 이상 지하수 혹은 유체를 지속적으로 장기적으로 양수하거나 주입한 사례가 거의 없어 이에 대한 조사 혹은 연구 역시 거의 없다. 앞서 언급한 이산화탄소 지중 저장 후보 지층과 같이 수평 방향의 경계가 닫혀 있다고 가정할 수 있는 경우에 대해서 역시 마찬가지이다. 하지만, 국외에서는 닫힌 경계에서의 양수 혹은 주입에 의한 압력 변화에 관해 종종 검토가 이루어져 왔다. 예를 들면 지하수와 관련된 단상 유체 흐름에 대해서 Kuiper (1972)와 Onder (1994)는 몇가지의 가정을 통해 Theis (1935)에 의해 제안된 지하수 양수에 따른 해석해를 닫힌 경계 조건에서의 해석해로 수정 제안하기도 하였다. 이산화탄소 주입의 경우는 지하수와 같은 단상의 흐름과는 다르기는 하나 Buckley and Leverett (1942)가 모래층 내에서 다상 유체 거동에 관한 수학적 모델을 제시한 이후 이 개념을 바탕으로 닫힌 경계 조건을 포함하는 등 수학적 모델에 대한 수정 제안들이 이루어져 왔다(Mathias *et al.*, 2011a, 2011b; Azizi and Cinar, 2013; Mijic *et al.*, 2014; Lin *et al.*, 2016; Tian *et al.*, 2016). 하지만, 다상 흐름에 관한 수학적 모델은 비록 이산화탄소 등과 같은 유체의 밀도 차에 의한 분별이나 포화도의 변화 등을 고려하기는 하였으나 1차원 축대칭 모형이라는 한계를 가진다. 물론 2차원 다상 유체의 흐름에 대한 해석해를 구성하는 것은 이론적으로 매우 어려운 작업이나, 이산화탄소 주입 시 저장층 내에서 유체의 흐름은 밀도 차에 의한 2차원적 흐름이 형성되게 된다. 따라서 이산화탄소 주입에 따른 저장층 내 유체 압력 변화는 거리와 높이라는 2차원적 해석이 필요하게 된다.

본 연구에서는 앞서 언급한 닫힌 경계에서의 다상 유체 흐름에 대한 수학적 모델에 대한 1차원적 접근

의 한계를 수치 모델링을 통해 보완하고자 하였다. 이와 함께, 이산화탄소 주입에 따른 지층 내 유체 압력 변화를 염수를 주입하는 단상 모델링 결과와 비교하고, 가스 포화도의 변화 등 이중상 흐름에 대한 수치 모델링 결과와의 비교를 통하여 이산화탄소 주입에 따른 지층 내 압력 변화의 기작을 검토하고자 하였다.

## 2. 모델의 구성(Model Settings)

본 연구의 목적은 단한 경계 조건을 가지는 시스템에서 장기적으로 이산화탄소와 같은 유체를 주입했을 때 발생하는 시스템 내의 압력 변화의 양상과 그 기작을 검토하는 것으로, 이를 위해 원통형 축대칭 모형(cylindrical axisymmetric model)을 설정하였다(그림 1). 원통형 축대칭 모형은 모델링 영역 경계의 형상적 특징에 의한 영향을 배제할 수 있고, 모델 영역의 수리적 특성 및 주입 조건의 영향에 의해서 그 결과가 규정되므로 본 연구의 목적을 달성하는 데 가장 적합한 형태의 모델이다. 유체 주입에 따른 압력 변화를 모의하기 위한 수치 모델로 본 연구에서는 TOUGH2 ECO2N을 이용하였다. TOUGH2는 비등온 다성분/다상 유체 거동에 관해 가장 널리 쓰이는 유한체적법(Finite Volume Method, 이하 FVM) 기반의 수치모델(Pruess *et al.*, 1999)로 지열의 활용, 방사성 폐기물 처분장 주변의 변화 및 환경변화 및 저감 평가 등에 널리 활용되는 대표적인 수치모델이다. TOUGH2는 해석하고자 하는 현상에 따라 다양한

상태 방정식(equation of state, 이하 EOS)을 선택적으로 활용할 수 있게 하고 있는데, 본 연구에서는 염대수층에서의 이산화탄소 지중저장 해석을 위한 모듈(Pruess, 2005)인 ECO2N 모듈을 이용하였다.

한편 단한 경계의 시스템에서 이산화탄소의 장기 주입 시 이산화탄소와 염수에 의한 다상/다성분의 거동은 비선형성이 강하고 이에 따라 공극 내 압력의 변화 양상을 현상적으로 명료하게 구분하기 어려운 경우가 많다. 따라서 우선 동일한 조건에서 염수 주입에 따른 결과를 통해 선형적 변화에 대한 부분을 먼저 검토하고, 이후 이산화탄소 주입에 따른 압력 변화 양상을 비교하여 시공간에서의 압력 변화에 대한 비선형성과 그 요인을 살펴 보고자 하였다.

### 2.1 모델 영역 및 입력 자료의 설정

모델 영역은 수직 2차원의 축대칭 모형으로 두께 50 m의 원통형 저장층을 가정하였으며(그림 1), 모델 영역의 반지름은 3, 4, 5, 6, 10 km 4 가지 경우를 상정하였다(표 1). 주입정은 모델 영역 최 좌측부에 하단으로부터 35 m 구간에 걸쳐 설치된 것으로 설정하였으며, 상하부와 우측 경계부는 유체의 유출입이 없는 단한 경계 조건을 상정하였다. 온도의 경우 모델 영역의 상하부는 각각 35°C와 38°C의 고정된 온도 조건, 좌우 측면은 열의 유출입이 없는 조건을 가정하였다(그림 1; 표 1). 저장층 내 유체 압력에 대한 초기 조건으로는 계산영역의 최상부의 압력을 9.0 MPa로 설정하고, 정수압 조건을 적용하였다.

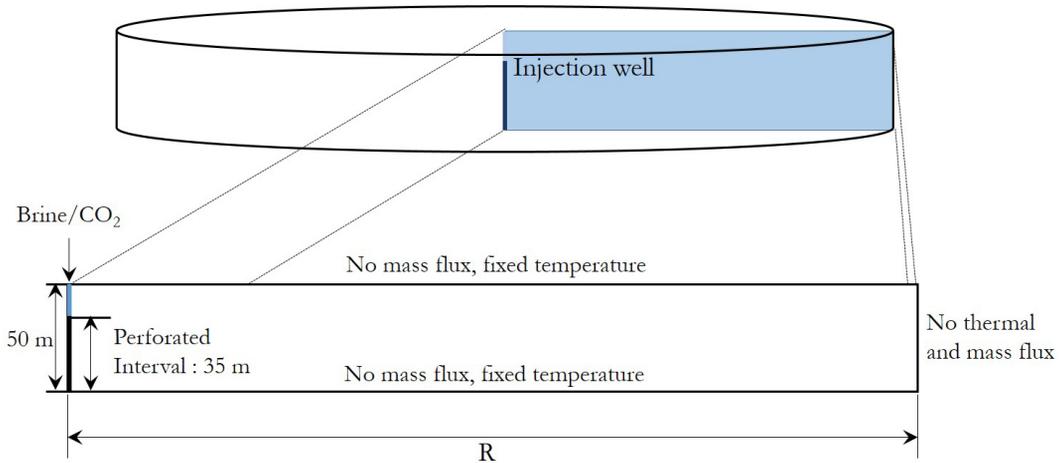


Fig. 1. Conceptual model and boundary conditions for numerical models in this study.

**Table 1.** List of input parameters in this study.

| Input Parameters   | Assigned Values   |
|--|---|
| Radius (R) or (Area)                                       | 4.0/5.0/6.0/10.0 km<br>(50.27/78.54/113.10/314.16 km <sup>2</sup> )                 |
| Injection rate ( $Q_m$ ): brine                            | 351,481.25 (kg/day) with 0.035 salt mass fraction                                   |
| CO <sub>2</sub>  | 54,432.0 × $t$ (kg/day) $0 \leq t \leq 5$ (day)<br>272,160.0 (kg/day) $t > 5$ (day) |
| Injection duration   | 20 (year)   |
| Permeability ( $k$ ): reservoir ( $k_x/k_y/k_z$ )          | $1.0 \times 10^{-13} / 1.0 \times 10^{-13} / 1.0 \times 10^{-13}$ (m <sup>2</sup> ) |
| well ( $k_x/k_y/k_z$ )                                     | $1.0 \times 10^{-13} / 1.0 \times 10^{-13} / 1.0 \times 10^{-8}$ (m <sup>2</sup> )  |
| Porosity ( $\phi$ )  | 0.1   |
| Pore compressibility ( $\alpha$ )                          | $0.5/1.0/2.0 \times 10^{-9}$ (Pa <sup>-1</sup> )                                    |
| Brine compressibility ( $\beta$ )                          | calculated by TOUGH2 ( $\approx 4.3 \times 10^{-10}$ Pa <sup>-1</sup> )             |
| Bulk thermal conductivity ( $\kappa$ )                     | 2.0 (W/m/K)   |
| Bulk specific heat ( $C$ )                                 | 1,000 (J/kg/K)  |
| Capillary entry/maximum pressure                           | $1,958.9/1.0 \times 10^7$ (Pa)  |
| Residual water saturation ( $S_{wr}$ )                     | 0.2   |
| Residual gas saturation ( $S_{gr}$ )                       | 0.1   |
| van Genuchten parameter $\lambda$                          | 0.457 (both in relative permeability and capillary pressure)                        |
| Initial pressure ( $P_0$ ) at top                          | 9.0 (Mpa)   |
| Initial temperature ( $T_0$ ) at top                       | 35°C with 6°C/100 m thermal gradient  |
| Background mass fraction of Salt ( $X_s$ )                 | 0.035 in brine  |
| Background mass fraction of CO <sub>2</sub> ( $X_{CO_2}$ ) | 0.0 in brine  |

주입정의 경우 열과 유체의 수직적 배분 과정을 최대한 현실적으로 모사하기 위하여 주입정 최상부 셀을 주입셀로 설정하고 주입 구간에 해당하는 셀의 수직 투과율을 저류층의  $1.0 \times 10^5$  배로 설정하였다. 이와 함께 모델링 과정에서 주입되는 유체를 주입정에 해당하는 각 셀에 인위적으로 분배하지 않고, 주입셀에 모두 할당하는 방식을 이용하였다. 이와 함께 주입 조건에서의 열유량도 문제가 될 수 있다. 실제 상황에서는 주입정을 통해 염수 혹은 이산화탄소가 주입되면 주입되는 유체를 통해 일정량의 열도 함께 주입되게 된다. 문제는 이 때 주입되는 열유량 (enthalpy)을 정량화할 방법이 마땅히 없다는 것이다. 따라서 모델링 과정에서 주입셀의 온도가 고정된다고 가정하였다.

염수 혹은 이산화탄소의 총 주입기간은 20년으로 가정하였으며, 이산화탄소의 주입율은 연간 10만 톤 규모로 가정하였다. 다만, 유체의 주입에 의한 공극 유체압의 상승은 질량이 아니라 주입된 유체의 부피

와 직접적으로 관련이 있음을 감안하여 염수의 주입율은 이산화탄소의 밀도를  $800.0 \text{ kg/m}^3$  (13.9 MPa, 35°C)로 가정하여 동일한 부피로 설정하였다(표 1). 또 이산화탄소의 주입율을 주입 시작 시점으로부터 5일간 0.0 kg/day에서 272,160.0 kg/day로 선형적으로 증가하도록 설정하였는데, 이는 상대투과율 변화에 대한 모형과 FVM을 위한 공간의 이산화 혹은 그리딩에 의해 발생하는 논리적 오류를 완화하고자 하는 것이다. 그 외 입력 자료는 표 1에 제시된 바와 같다.

## 2.2 민감도 분석

통상적으로 알려진 바와 같이 열린 시스템에서 지하 유체 주입 혹은 생산 시 압력 변화에 영향을 주는 가장 큰 요인은 주입율 혹은 생산율을 제외하면 고유투과율(intrinsic permeability)이다. 물론 비저류 계수 혹은 지층의 공극 유체압에 대한 압축률 역시 영향을 미치지만, 이는 압력 전파 시간에 관한 부분

일 뿐이며 압력 변화량 자체에 영향을 주는 것은 아니다. 하지만, 달린 시스템에서의 압력 변화에 영향을 주는 요인은 달라 지게 된다(Kuiper, 1972; Zhou *et al.*, 2008). 특히 주입정에서 달린 경계면까지의 거리와 두께 등을 포함한 공극의 총부피 및 공극압력 변화에 따른 공극 부피 변화율을 나타내는 압축율(compressibility)은 달린 시스템에서 주입에 따른 공극 내 유체 압력 변화에 대한 중요한 요인이 될 수 있다. 본 연구에서는 지층의 총 부피와 공극 압축율에 따른 영향을 검토하고자 모델 영역의 반지름을 4/5/6/10 km로 4가지 경우를 상정하고, 각 반지름을 갖는 시스템에 대한 공극의 압축률,  $\alpha$ 를 0.5/1.0/2.0×10<sup>-9</sup> (pa<sup>-1</sup>) 다시 3가지 경우로 가정하여 총 12개에 해당하는 모델을 구성하였다(표 1).

### 3. 결과 및 토의

일반적으로 염수층에 이산화탄소를 주입하여 이루어지는 변화는 두 유체 간의 상호간섭이 발생하는 이중상 흐름(miscible two-phase flow)에 의해 발생하게 되며, 비선형성을 가지게 된다. 따라서 모델링 결과에 대한 서술 역시 우선 염수 주입에 따른 선형적 변화 양상에 관해 정리하고, 이산화탄소 주입에 따른 변화를 현상적으로 검토한 후 두 결과에 대해 비교하는 형식으로 정리하였다.

#### 3.1 염수 주입(Brine Injection)

달린 경계를 가진 시스템에서 염수를 장기 주입할 경우 주입정에서의 유체압력의 변화 중 현상적으로 가장 먼저 확인할 수 있는 변화는 주입 초기 일정시간 내 압력이 급격히 상승한 이후 시간에 따라 선형적으로 상승한다는 것이다(그림 2a). 이 때 공극 압력이 상승하는 기울기는 시스템의 반지름과 공극의 압축률,  $\alpha$  (Pa<sup>-1</sup>)가 작을수록 커지고 있다. 하지만, 초기를 제외한 압력 상승의 기울기가 공극의 압축률 ( $\alpha$ )과 정확한 반비례 관계를 보여 주지는 않는다. 공극 유체압력의 시간에 대한 기울기는  $R=4$  km,  $\alpha=5.0 \times 10^{-10}$  Pa<sup>-1</sup>인 경우 1.59 (kPa/day)로 가장 크며,  $R=10$  km,  $\alpha=2.0 \times 10^{-9}$  Pa<sup>-1</sup>인 경우  $9.26 \times 10^{-2}$  (kPa/day)으로 가장 작다.

주입정에서의 시간에 대한 선형적 압력의 증가는 시스템의 반지름에 따라 다르나 주입개시 이후 짧게

는 약 30 일( $R=4$  km,  $\alpha=5.0 \times 10^{-10}$  Pa<sup>-1</sup>)에서 길게는 약 500 일( $R=10$  km,  $\alpha=2.0 \times 10^{-9}$  Pa<sup>-1</sup>) 정도의 시간( $T_{BND}$ )이 경과한 이후부터 시작되게 된다. 이 기간 동안 주입정을 포함한 지층 내에서의 유체 공극압의 증가는  $\log(t)$ 에 비례하여 증가하게 된다(그림 2b). 주입 개시 이후  $T_{BND}$ 의 시간이 경과하고 나면 달린 경계부에서 압력의 증가가 시작되는데, 이 때 유체압의 증가는 앞서 주입정에서의 경우와 같이 시간에 대해 선형적으로 증가하게 된다(그림 2c). 이 때 경계면에서의 시간에 대한 압력 증가율은 같은 시기 주입정에서의 압력 증가율과 같으며, 주입정과 경계면 간의 유체 압력차는 일정하게 유지되게 된다.

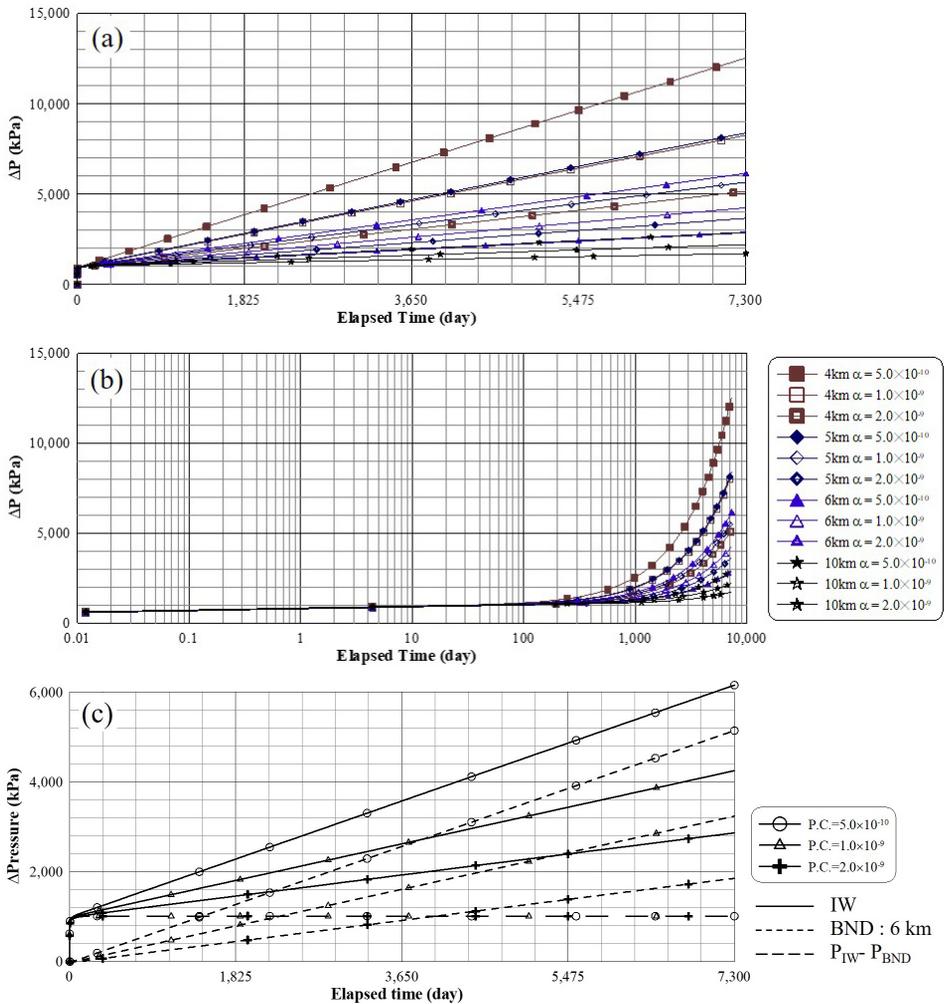
이 때  $\log(t)$ 에 비례하여 유체 공극압이 증가하는 시기는 주입에 의해 상승한 압력이 주입정에서부터 거리( $r$ )가 먼 지역으로 공간적으로 전파되어 가는 시기(propagation stage)로 온도 변화가 유발하는 밀도 및 점성도 변화에 의한 오차를 제외하면 Theis 곡선(Theis curve) 혹은 Jacob 직선(Jacob straight line)과 동일한 변화 양상을 보이고 있다. 그리고 유체 압력의 Theis 곡선 혹은 Jacob 직선을 따르는 변화는 시간( $t$ )에 대해서만 것이 아니라 주입정으로부터의 거리( $r$ )에 대해서도 마찬가지로 적용된다(그림 3a). 다시 말하면 주입정으로부터 거리( $r$ )에 따라 유체의 압력이 점차 감소하게 되는데, 이 때 압력은  $\log(r)$ 에 대해 직선적으로 감소하게 된다는 것이다. 문제는 압력 전파 단계가 끝나는 시간( $t_{BND}$ ) 이후에 거리에 따른 압력의 분포가 어떻게 변하는가 인데, 그림 3b에 나타난 바와 같이 거리  $r$ 에 대한 압력구배는 시간의 흐름에도 거의 변하지 않는다. 즉, 그림 3a에 보이는  $t_{BND}$  이후는 압력 상승이 유체와 지층을 포함한 전체 시스템의 균일한 압축에 의해 일어나는 압축 단계로 이행하게 된다. 이 시기의 압력 증가는  $\log(t)$ 가 아니라  $t$ 에 비례하여 선형적으로 증가하게 된다.

#### 3.2 이산화탄소 주입(CO<sub>2</sub> Injection)에 따른 압력 변화

이산화탄소의 주입에 따른 시스템 내 유체 압력 변화는 정성적인 측면에서는 앞서 서술한 염수를 주입하는 경우와 크게 다르지 않다. 즉, 주입정으로부터 거리에 따라 우선 공간적으로 유체 압력이 전파되는 압력 전파 단계를 거쳐 일정한 시간,  $t_{BND}$ 를 지나면 유체와 지층의 압축에 의해 유체의 압력이 시간에 따라 증가하게 된다(그림 4a, 4c). 하지만 앞서

서술한 염수 주입에 따른 반응과는 몇가지 점에서 차이를 보이고 있는데, 가장 두드러지는 점은 초기 압력변화이다. 우선은 염수의 경우와는 달리 압력 전파 단계에서도  $\log(t)$ 에 대해 선형적인 변화를 보이지 않는다. 물론 이는 '모델의 구성'에서 설명한 바와 같이 수치적/논리적 오차에 의한 주입 초기의 주입정에서의 급격한 압력 증가 현상을 제어하기 위해 초기 5 일간 주입량을 시간에 대해 선형적으로 올리는 설정(표 1)과도 관련이 있을 수 있다. 특히 그림 4b의 5 일 이내의 초기 압력 상승 기울기 상승은 이러한 주입량 증가 설정에 의한 것일 개연성이 높다. 하지만, 주입 개시 후 5 일 경과 후에도 주입정에서

의 유체압력은 주입 개시 이후 약 20 일 경과 시점까지 상승 경향을 보이는데 초기 유체 압력과의 차이 ( $\Delta P$ )는 약 960~1,060 kPa 정도이다. 이후 짧게는 27 일(4 km,  $\alpha=5.0 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ )에서 길게는 약 933 일(10 km,  $\alpha=2.0 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ ) 시점에 각각 856.9, 575.5 kPa 까지 낮아진 후 다시 상승하게 된다(그림 4b). 일단 압력이 다시 상승하게 되면 이후로는 시간에 따라 지속적으로 증가 양상을 보인다. 닫힌 경계부에서의 압력 변화는 일단 상승하기 시작한 이후 지속적으로 상승하는 경향을 보여 주며, 시간에 대해 거의 선형적인 상승 형태를 보이고 있다(그림 4c). 하지만, 주입정에서의 압력 상승 정도와의 차이를 살펴 보면



**Fig. 2.** Pressure rises at injection wells with the arithmetic scale (a), the semi-log scale (b) and pressure rises at injection wells/boundaries and pressure differences between well and boundary in cases with 6 km radius (c) during brine injection for 20 years.

염수를 주입했을 경우와는 다르게 시간이 지남에 따라 점점 작아지는 경향을 보이고 있다.

공간적인 압력 전파 양상 역시 정성적으로는 염수 주입의 경우와 유사하다. 즉, 이산화탄소의 주입이 계속되면 주입정으로부터 경계부까지 우선 압력이 확산되어 가다가, 이 압력의 확산이 경계부까지 도달하고 나면 이 후로는 압축에 의한 압력 상승이 이루어 지게 된다. 하지만, 염수 주입의 경우와 가장 큰 차이점은 공간에 대한 압력 구배가 시간적으로 뿐만 아니라 공간적으로 일정하지 않게 변한다는 것이다. 그림 5는 반지름 6 km, 공극 압축률(pore compressibility)  $\alpha$ 가  $2.0 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 인 경우의 거리에 따른 유체 압력변화와 그 압력구배를 도시한 것이다. 앞서 염수 주입의 경우 거리에 따른 압력 구배는 시간에 따라 변하지 않으면서 유체의 압력이  $\log(r)$ 에 선형적으로 변하는 양상을 보여 주었으나, 이산화탄

소 주입의 경우에는 유체의 압력이 거리에 따른 감소하기는 하나  $\log(r)$ 에 대해 선형적으로 감소하는 경향을 보이지 않으며, 압력 구배가 시간에 따라 변할 뿐만 아니라, 깊이에 따라서도 달라지는 양상을 보여 준다(그림 5). 주입정으로부터 거리에 따른 압력 분포 중 가장 주목할 만한 변화 양상은 주입 개시 이후 100 일 시점에서의 압력과 365 일 시점에서의 압력의 변화 양상이다. 주입정으로부터 거리가 50 m 보다 먼 경우의 유체 압력은 시간의 흐름에 따라 지속적으로 상승하는 경향을 보인다. 이때 주목할 만한 점은 50 m 이내 거리에서의 압력 변화로 이 거리 이내에서는 주입 개시 이후 100 일 시점에서의 유체 압력이 365 일 시점에서의 유체 압력보다 오히려 높게 나타난다. 이 경우 모델 영역의 최상부에서는 전반적으로 압력구배( $-dp/dr$ )가 5.0 미만의 매우 작은 값을 보여 주며, 주입정 부근이 오히려 일정 거리까

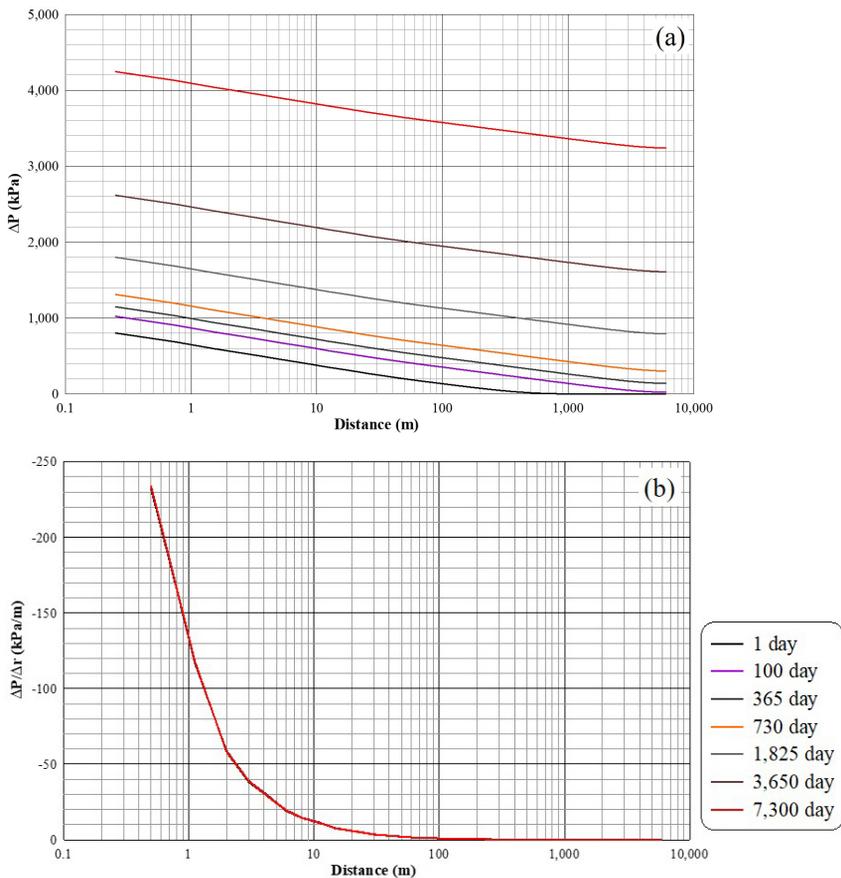


Fig. 3. Pressure rises (a) and pressure gradients (b) along with the distance from injection well in case with 6 km radius and  $1.0 \times 10^{-9} \text{ pa}^{-1}$  pore compressibility during brine injection.

지는 더 낮은 압력 구배를 보여 주기도 한다. 이는 모델 설정에서 주입 구간을 50 m 두께의 저장층 전구간이 아니라 하부로부터 35 m 구간만을 주입 구간으로 설정하여 주입구간 심도에 비해 모델 영역 최상부에서 주입정으로부터 일정 거리까지 압력이 분산되기 때문이다. 실제로 모델 설정상 주입구간에 해당하는 모델 영역 중앙부(상부로부터 25 m 심도)와 최하부에서는 최초 1 일 경과 시점을 제외하면 전반적으로는 주입정에서의 거리가 멀어지면 질수록 압력구배도 함께 감소하는 패턴이 나타나고 있다(그림 5). 이 중앙부나 최하부 영역에서 거리에 따른 압력구배의 최대값은 주입 직후를 제외하면 주입정 인근

에서 20 kPa/m 내외의 값을 보여 주는데, 이는 염수 주입의 경우(230 kPa/m)에 비해 1/10 이하의 값이다. 이와 함께 주입정으로부터 일정 거리 이격된 지점에서 압력구배가 살짝 증가하거나 감소 경향이 매우 완만해지는 양상을 보여 주는데, 이 이격 거리는 시간의 흐름에 따라 주입정으로부터 점차 멀어지는 양상을 보여주며 그 정도가 점차 작아지게 된다(그림 5).

3.3 압축 구간에서의 유체 압력의 상승

Kuiper (1972)는 닫힌 경계 조건을 가지는 시스템에서 장기간 양수를 할 때  $\tau = \eta / SR^2 > 0.25$  (단,  $T$ 는 투수량계수,  $S$ 는 저유계수,  $t$ 는 양수지속시간,  $R$ 은

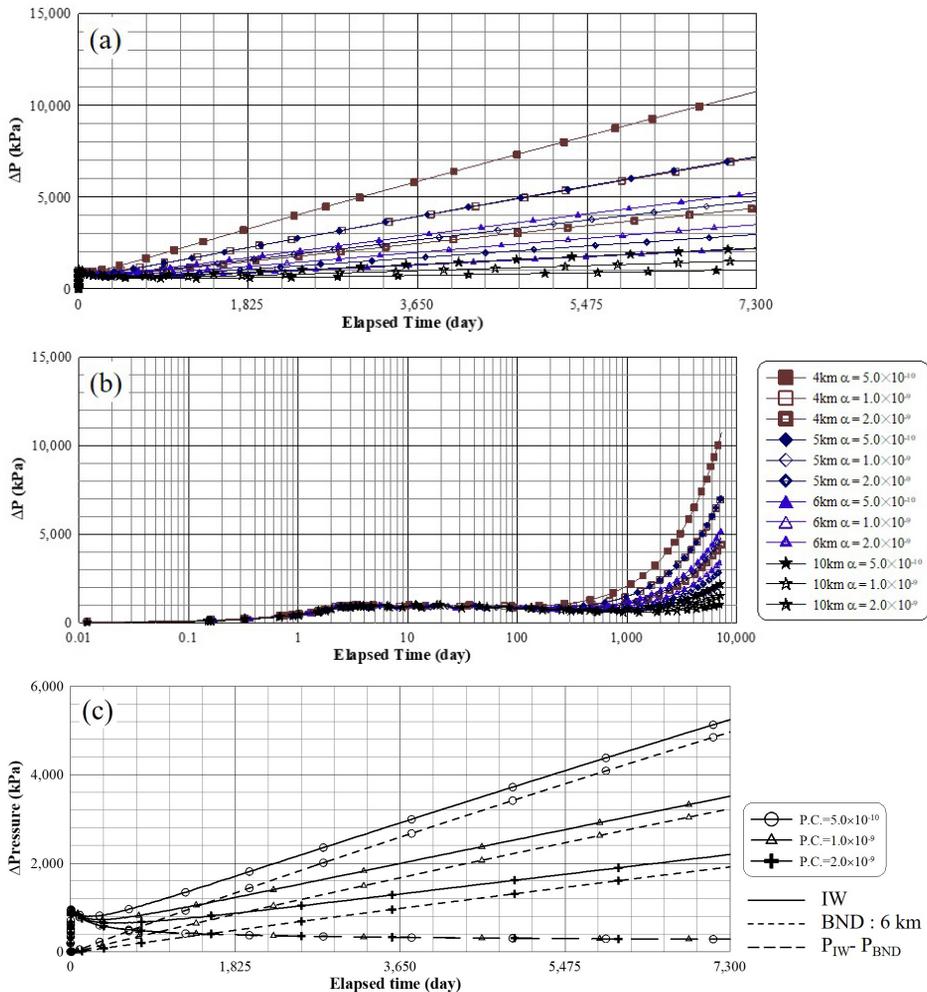
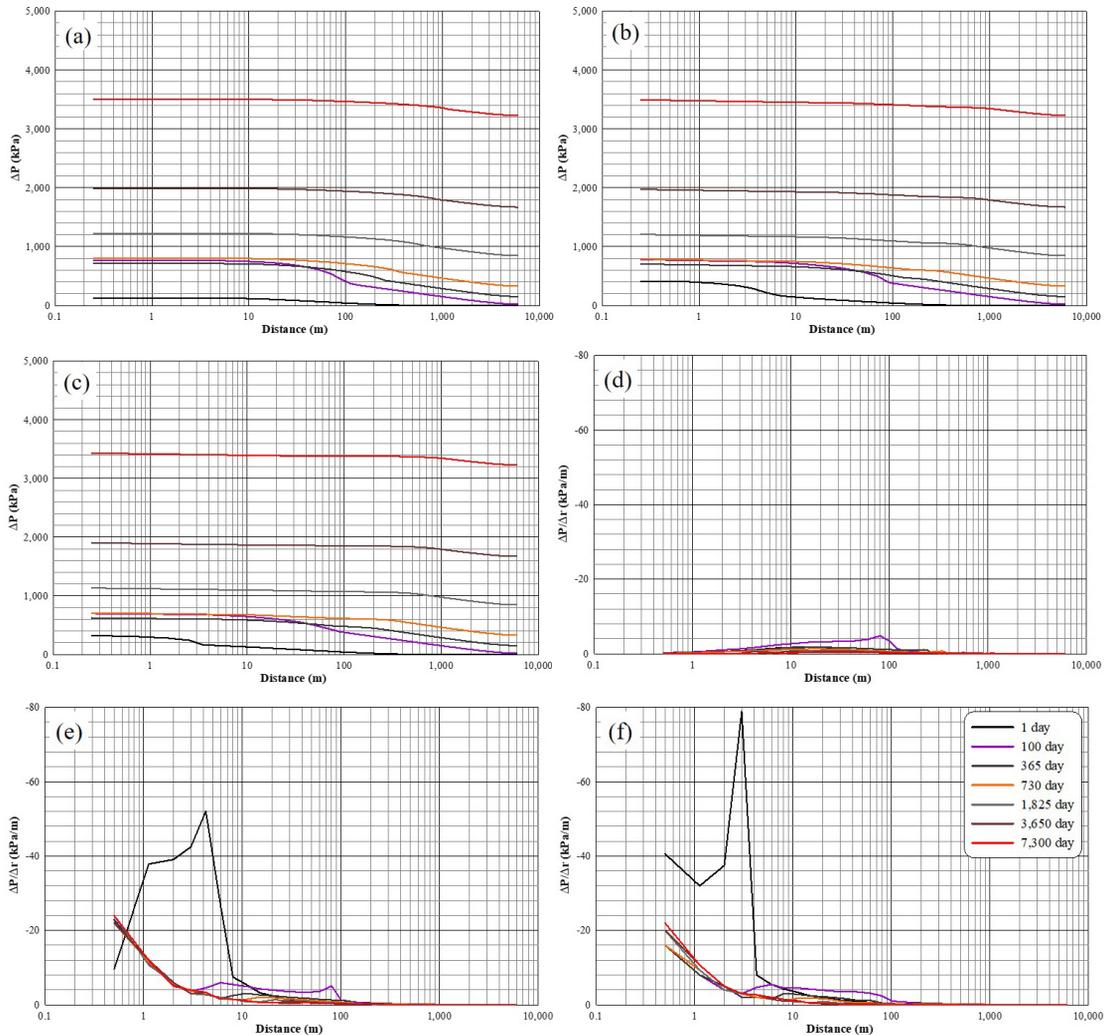


Fig. 4. Pressure rises at injection wells with the arithmetic scale (a), the semi-log scale (b) and pressure rises at injection wells/boundaries and pressure differences between well and boundary in cases with 6 km radius (c) during carbon dioxide injection for 20 years.

시스템의 반지름)인 경우 지하수위의 강하량이 Theis의 해(Theis, 1935)와 달라 지게 된다고 언급한 바 있다. 물론 열역학적 상태 변화가 없다고 가정하는 등 온조건의 해인 Theis (1935)나 Kuiper (1974)의 해를 열역학적 상태 변화를 고려하는 TOUGH2 ECO2N 모델의 결과와 단선적으로 비교하는 것은 정확하지 않을 수 있으나, 물리적 변화의 경향이라는 측면에서는 충분히 고려해 볼 수 있을 것이다. 모델 상의 온도 및 압력 조건을 고려할 때 Kuiper가 제시한  $\tau=0.25$ , 즉 지속적인 양수나 주입에 의한 압력의 변화가 Theis 해와 달라 지게 되는 시간  $t$ 는 최단 30.14일(4 km,  $\alpha$

$=5.0 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ )에서 최장 492.19일(10 km,  $\alpha=2.0 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ )이다. 이 때, 염수의 점성도(viscosity,  $\mu_0$ )는  $7.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 압축률(compressibility,  $\beta$ )은  $4.3 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 로 가정하였다. 다만, Kuiper가 제시한 Theis 해와 달라 지게 되는 시간,  $\tau=0.25$ 는 다소 논란의 여지가 있다. 반면에 이산화탄소 주입시 본격적으로 유체의 압력이 상승하기 시작하는 시점은 이보다 훨씬 느린데, 4 km,  $\alpha=5.0 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 의 경우 가장 짧은 100.0일 경과 시점, 10 km,  $\alpha=2.0 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 의 경우 가장 긴 933.5일 경과 시점에서 본격적으로 압력의 상승이 시작된다. 그리고 염수나 이산화탄소 어떤 유체를 주입하던



**Fig. 5.** Pressure rises in top (-901 m) (a), mid (-925 m) (b), bottom (-949 m) (c) and temporal changes in pressure gradients in top (d), mid (e), bottom (f) along with the distance from injection well in case with 6 km radius and  $1.0 \times 10^{-9} \text{ pa}^{-1}$  pore compressibility during CO<sub>2</sub> injection.

본격적인 상승 시작 이후 일정한 시간이 지나면 시간에 대해 '거의' 선형적인 압력 상승이 진행된다.

압축기에서 시간에 따른 압력 상승률( $\Delta p/\Delta t$ )은 저장층의 겉보기 압축률(bulk compressibility;  $\alpha+\beta$ )과 총공극의 부피에 반비례하는 양상을 보인다(그림 6). 즉,

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \propto \frac{1}{(\alpha+\beta)V_{pore}} \quad (1)$$

의 관계가 성립된다. 이로부터 계산된 압축 단계에서의 시간에 대한 압력 상승률과 압축률 및 총공극부피 간의 관계는 그림 6a에 제시된 바와 같다. 이 때 염수를 주입하는 경우가 이산화탄소를 주입하는 경우에 비해 동일한 조건에 비해 좀 더 큰 압력변화율(dp/dt)를 보여 주는데, 이는 이산화탄소의 압축률이 염수의 압축률에 비해 훨씬 크기 때문이다(그림 7). 37°C, 13 MPa의 조건에서 물의 압축률은  $4.29 \times 10^{-10} \text{ pa}^{-1}$ 인 반면 이산화탄소의 압축률은  $2.46 \times 10^8 \text{ pa}^{-1}$ 이며(Modified from Lemmon *et al.*, retrieved 2019) 이 때문에 이산화탄소 주입 시에는 염수 주입의 경우와는 다른 공극 유체의 압축률이 작용하게 된다. 이산화탄소 주입에 따른 염수와 이산화탄소를 함께 고려한 유체의 압축률을  $\beta$  이라고 할 때,  $\beta$  은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\beta = \frac{V_{CO_2}\beta_{CO_2} + V_{brine}\beta_{brine}}{V_{total\ pore}} \quad (2)$$

이 때,  $V_{CO_2}$ ,  $V_{brine}$  은 각각 저장층 내에서 초임계상의 이산화탄소와 염수의 총부피,  $\beta_{CO_2}$ ,  $\beta_{brine}$  은 초임계상의 이산화탄소와 염수의 압축률,  $V_{total\ pore}$  는 저장층의 총 공극 부피이다. 식 (2)를 이용하면 이산화탄소 주입 조건에서의 압력 상승률과 겉보기 압축률 간의 관계 식 (1)은,

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} \propto \frac{1}{(\alpha+\beta')V_{pore}} \quad (3)$$

로 수정되어야 한다. 연구에서 적용한 이산화탄소 주입 지속 기간인 20 년의 시점에서 저장층 공극 내 가스상의 이산화탄소가 차지하는 부피의 비율은 최소 0.16%(반경 10 km,  $a=5.0 \times 10^{10} \text{ Pa}^{-1}$ )에서 최대 0.92%(반경 4 km,  $a=2.0 \times 10^9 \text{ Pa}^{-1}$ )에 불과하나, 37°C, 13 MPa의 조건에서 이산화탄소의 압축률은 물의 압축률의 57.5 배에 이르기 때문에, 식 (2)에 따른 혼합 유체의 압축률( $\beta$ )은 물의 압축률( $\beta$ )에 대해 1.09~1.52 배 크게 나타난다. 그리고 이 혼합 유체의 압축률,  $\beta$  을 이용하여 모델링 경과 상에서 압축기의 압력 상승률과 겉보기 압축률(bulk compressibility) 및 총 공

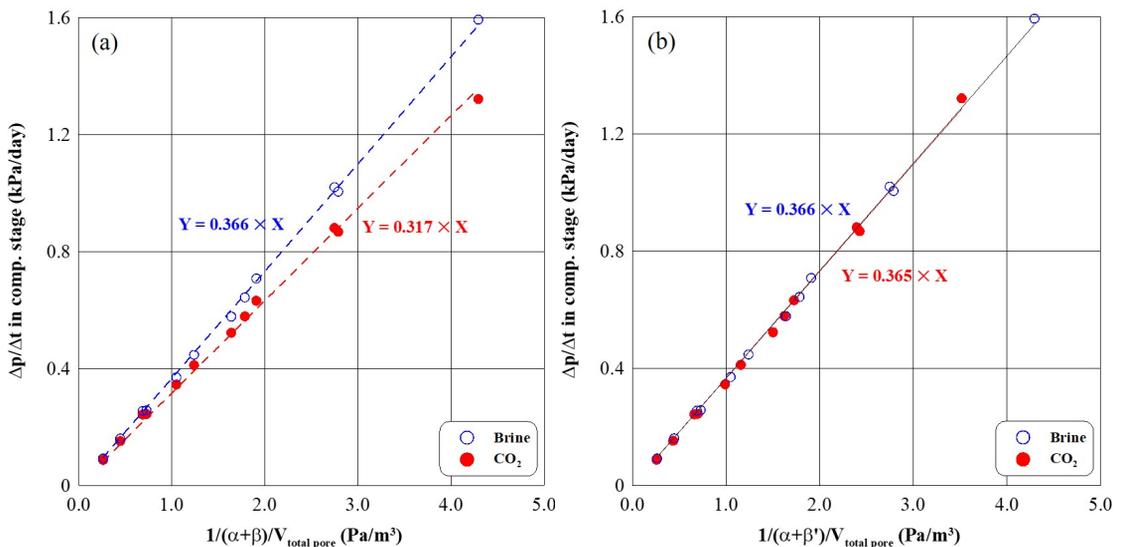


Fig. 6. Relations between bulk compressibilities and  $Dp/Dt$  in the compressional stage with a water compressibility (b) (a) and the compressibility of mixed fluid ( $\beta'$ ) (b).

극 부피 간의 관계를 도시해 보면 염수나 이산화탄소 주입의 경우에 관계없이 반비례함을 확인할 수 있다(그림 6b). 다만, 압력의 변화에 거의 변하지 않는 물의 압축률과는 다르게 이산화탄소의 압축률은 12 Mpa이하의 압력에서는 압력의 변화에 따라 매우 크게 변하므로(그림 7) 보다 정확한 해석을 위해서는 이에 대해서도 고려하여야 한다.

### 3.4 압력전파의 공간적 변화와 그 특성

염수 주입의 경우 일단 주입에 따른 압력 변화가 경계부까지 전파되고 나면 주입정으로부터 거리에 따른 압력 구배가 그대로 유지되면서 전체 저장층에서 균질하게 유체 및 저장층의 압축에 의해 압력이 일정하게 상승하나(그림 3), 이산화탄소 주입의 경우 공간적인 압력 분포, 압력구배 및 그 변화는 시간에 따라 지속적으로 변하는 양상을 보여준다(그림 5).

일반적으로 지하 지층에서 유체가 거동하기 위해 형성되는 압력 구배에 가장 큰 영향을 주는 것은 유동 유체의 부피 유량(volumetric flow rate)과 유체의 거동성(mobility)이다. 현 모델링에서 유동 유체의 부피 유량과 직접 관련되는 것은 주입율(injection rate)과 주입 유체의 밀도 혹은 온도-압력 조건이다. 통상적으로 물은 압축률이 매우 작아 압력의 변화에 관계없이 질량 주입율(mass injection rate)과 부피 주입율(volumetric injection rate)을 크게 구분하지 않으나, 이산화탄소의 경우 온도-압력, 특히 압력 조건의 변화에 의해 질량 주입율과 부피 주입률 간의

비가 크게 달라질 수 있다. 물의 경우 본 모델링 조건에서의 밀도 변화는 37°C를 기준으로 압력이 10 Mpa에서 15 Mpa로 상승한다고 할 경우에서 997.64에서 999.77 kg/m<sup>3</sup>으로 약 0.19%, 14 Mpa을 기준으로 온도가 35°C에서 40°C로 상승할 경우 1,000.08에서 998.23 kg/m<sup>3</sup>으로 약 -0.21%의 변화를 보이는 반면에 같은 조건에서 이산화탄소는 압력의 변화에 대해 683.40에서 801.507 kg/m<sup>3</sup>으로 14.74%, 온도에 대해 801.41에서 763.27 kg/m<sup>3</sup>으로 -4.76%의 밀도 변화가 일어난다(Lemmon *et al.*, retrieved 2019; 그림 8a). 즉, 수치 모델링 상에서 일정 질량 주입을 조건을 적용하였을 때 부피 주입율은 염수의 경우 10에서 15 Mpa로의 압력 상승에도 불구하고 거의 일정하게 유지되지만, 이산화탄소 주입의 경우 동일한 압력 변화에서 거리(*r*)에 대한 압력 구배가 14.74% 감소하여야 한다는 것이다. 물론 이것은 밀도만을 고려할 경우이며, 이산화탄소 주입 시 주입정으로부터 거리에 대한 압력 및 압력 구배의 변화는 이보다 훨씬 복잡하다. 이는 염수 주입 결과인 그림 3과 이산화탄소 주입 결과인 그림 5의 압력구배 차이를 비교해 보면 보다 명확해 진다. 염수 주입의 경우 압력 구배는 주입정 인근에서 최대인 약 230 Kpa/m, 주입정으로부터 1 m 거리에서는 약 130 Kpa/m를 주입 시작 시점부터 모델 종료 시점인 20 년까지 유지하는 반면, 이산화탄소 주입의 경우 저장층 상부, 주입정의 주입구간 상부를 제외하면 주입정 인근에서 압력 구배는 약 23 Kpa/m, 주입정으로부터 1 m 거

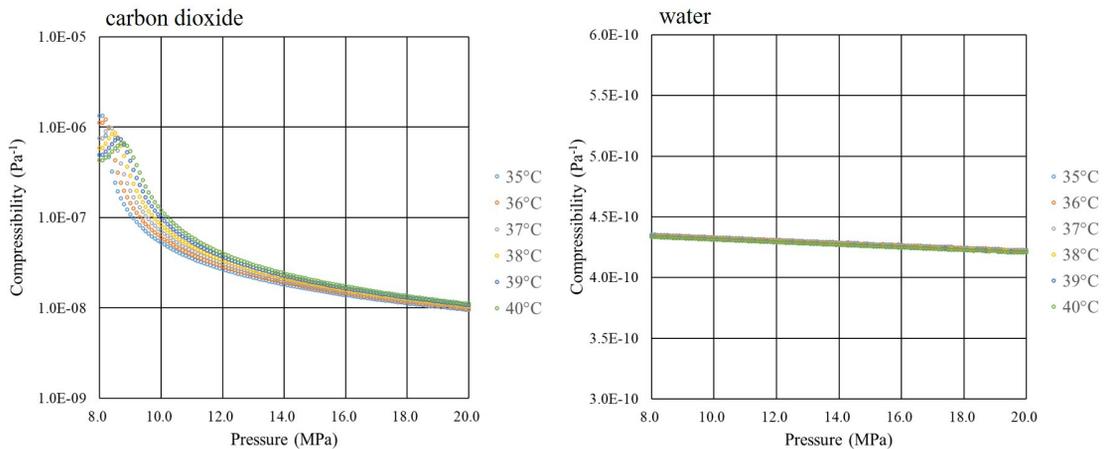


Fig. 7. Compressibilities of water (a) and CO<sub>2</sub> (b) (modified from Lemmon *et al.*, 2019).

리에서는 약 12 Kpa/m로 염수 주입의 경우와 비교하여 약 1/10 수준의 값을 보일 뿐이다. 그리고 주입 정 부근에서의 압력구배는 시간의 경과에도 주목할 만한 차이를 보이지 않는다. 이는 약 14.74% 밀도 차이에 의한 압력 구배 변화는 이산화탄소 주입에 따른 압력 분포 변화에서 중요한 변수가 아니라는 것을 의미한다. 이를 설명하기 위해서는 유체의 유동성 (mobility;  $M$ ) 문제를 살펴 볼 필요가 있다.

지하 지층 내에서 유체의 유동성은 일반적으로 매질 인 지층의 특성인 고유 투과율(intrinsic permeability) 과 매체인 유체의 특성인 점성도(viscosity)에 의해 주로 규정된다. 투과율은 유동성에 비례하고 점성도는 유동성에 반비례하는 관계를 가지므로, 염수와 이산화탄소의 다상 흐름에서는 각 유체의 포화도에 따른 상대투과율의 변화 역시 유동성을 규정하는 중요한 요소로 작용한다. 즉, 지하 매질에서 특정 유체,  $f$ 의 유동성,  $M_f$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M_f = k \frac{k_{r,f}}{\mu_f} \quad (4)$$

이 때,  $k$ 는 매질의 고유투과도,  $k_{r,f}$ 는 유체  $f$ 의 상대 투과도,  $\mu_f$ 는 유체  $f$ 의 동점성도(dynamic viscosity)이다. 그리고 앞서 언급한 부피 유량은 식(4)의 유동성과 거리에 따른 압력구배의 곱으로 정의된다. 본 모델링 상에서 염수의 부피 주입율과 이산화탄소의 부피 주입율이 거의 유사하다고 본다면(14 Mpa, 37°C

기준) 앞서 언급한 이산화탄소 주입 시 형성되는 염수 주입 대비 1/10 수준의 압력 구배는 유동성의 변화에 의한 것이라고 보아야 한다. 37°C를 기준으로 물의 동점성도는 9.0에서 17.0 Mpa의 압력 변화에 대해  $6.920 \times 10^{-4}$  pa·s에서  $6.925 \times 10^{-4}$  pa·s로 거의 일정한 값을 보여 주는 반면 이산화탄소의 동점성도는  $4.578 \times 10^{-5}$  pa·s에서  $7.578 \times 10^{-5}$  pa·s의 값을 보인다 (그림 8b). 이는 각각 물의 동점성도의 6.62~10.93%에 해당하는 값으로 이산화탄소의 주입에 따른 유동성 증가 기작을 잘 설명해 줄 수 있다. 점성도의 변화에 따른 압력 구배 변화는 시간에 따른 이산화탄소 포화도 변화를 통해 보다 명확하게 확인할 수 있다 (그림 9).

이산화탄소 포화도와 점성도 변화에 따른 압력 구배의 변화는 주입정으로부터의 거리에 따라 3개의 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째 단계는 주입정으로부터 해당 심도에서 가스상의 이산화탄소가 확장한 지점까지로 저장층의 최하부에서는 60~70 m 거리의 지점으로 주입 초기를 제외하면 거의 고정되어 있으며, 중간 심도에서는 주입 개시 100 일 시점에는 약 90 m 거리에서 최종 20년 시점에는 약 300 m 거리 지점이 이에 해당한다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계의 거리로부터 저장층 최상부에서 가스상의 이산화탄소가 확장한 지점까지로 주입 개시 이후 100일 시점에서 약 100 m 거리에서 최종 20년 시점에는 약 1,000 m 지점까지 확장된다. 마지막 세 번째 단계는 그보다 더 먼거리의 지점이다. 다만 저장층의 최상

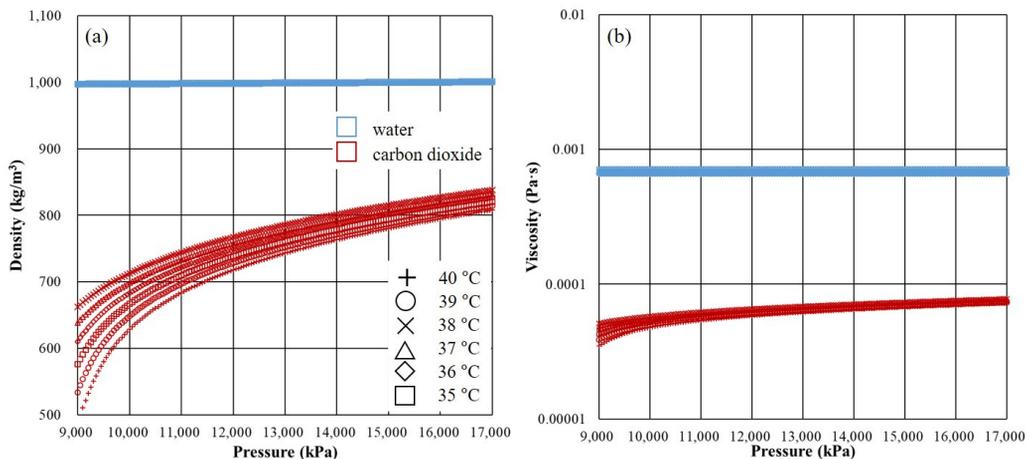
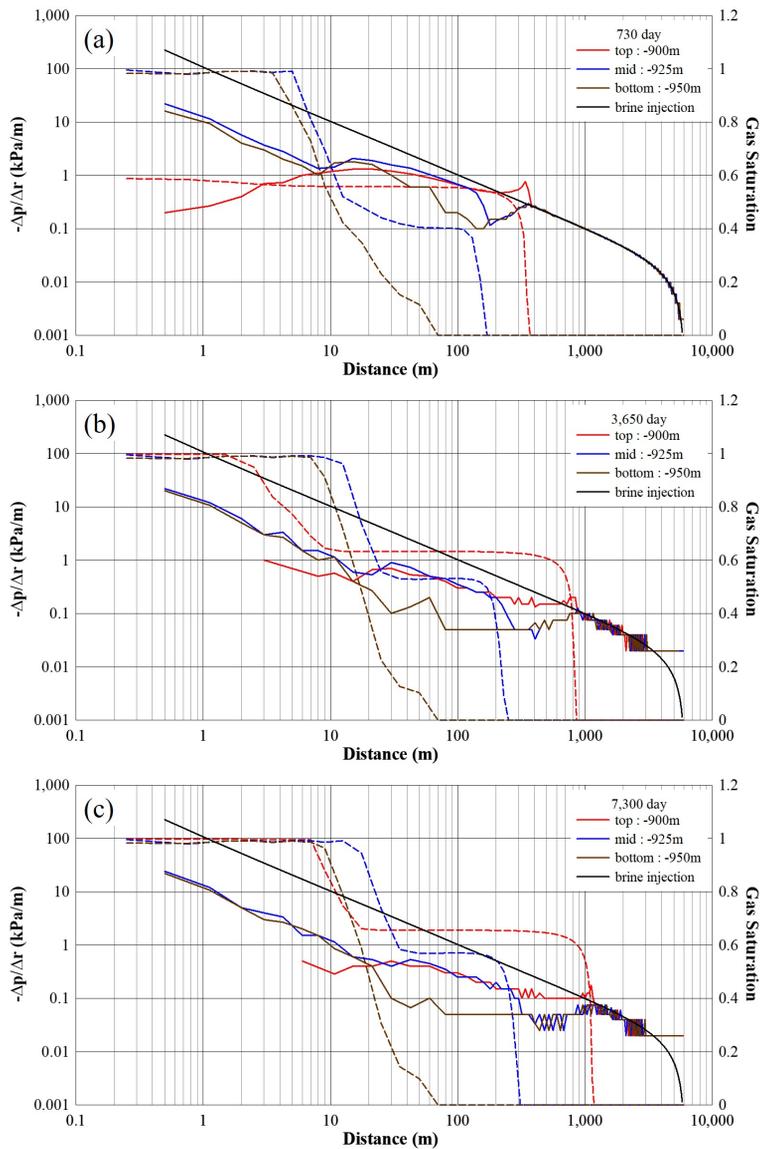


Fig. 8. Densities (a) and Viscosities (b) of water and CO<sub>2</sub> (modified from Lemmon *et al.*, 2019).

부는 첫 번째 단계와 두 번째 단계가 구분되지 않는다. 모델링 조건에서 이산화탄소의 동점성도가 물의 약 1/10 정도라고 본다면 가스 상의 이산화탄소 상대투과율이 0.1 이상이 되면 모든 공극이 염수로만 채워진 경우보다 더 큰 유동성을 가지게 되는데, 본 모델링 상에서는 이산화탄소의 상대 투과율이 0.1이 되는 가스의 포화도는 0.38이나, 첫 번째 단계의 거리 이내에서의 압력구배 변화 가스 포화도 약 0.6의

값을 기준으로 다시 세분된다. 최상부를 제외하면 주입정으로부터 거리가 멀어짐에 따라  $\log(r)$ 에 반비례하여 떨어지던 압력구배가 이산화탄소 포화도 약 0.6이하로 떨어지는 거리에서 살짝 반등하는 양상을 보여 준다(그림 9a 저장층 중앙부 및 하부, 그림 9b 및 c 중앙부). 반면 이 보다 가까운 거리에서는 염수를 주입하는 경우에 비해 1/10 내외의 압력구배 값을 보여주고 있다. 첫 번째 단계의 그 다음 변화는 이



**Fig. 9.** Variations in pressure gradients and gas saturations along with the distance from injection well at 730 day (a), 3,650 day (b) and 7,300 day (c) in the case with 6km radius and  $1.0 \times 10^{-9} \text{ pa}^{-1}$  pore compressibility during CO<sub>2</sub> injection.

산화탄소의 포화도가 0으로 떨어지는 거리에서 나타나며, 이 때 압력 구배는 계단 모양으로 떨어지는 양상을 보여준다. 이는 모세관압의 상승과 상대투과율의 하락에 의한 것이다. 최상부를 제외한 중앙부와 하부 심도에서 두번째 단계에 해당하는 거리는 해당 심도의 이산화탄소 포화도가 0이 된 지점부터 최상부의 이산화탄소 포화도가 0이 되는 지점까지의 거리인데, 이 구간에서의 압력구배는 큰 변화없이 거의 일정한 값을 보이다가 최상부 구간의 가스 포화도가 급격히 0으로 떨어지는 지점에서 다소 상승하는 경향을 보여준다(그림 9). 세번째 단계의 거리는 가스상의 이산화탄소가 도달하지 못한 구간에 해당하며, 이 구간에서의 압력구배는 심도에 관계없이 염수를 주입하는 경우와 일치한다(그림 9).

4. 결론

지금까지 닫힌 경계조건을 가지는 저장층에서 이산화탄소를 장기적으로 주입할 경우 일어나는 저장층 내 압력 변화 양태와 그 변화를 일으키는 요인을 염수 주입의 경우 일어나는 압력 변화 양태와 비교를 통해 살펴 보았다. 닫힌 경계 조건을 가지는 저장층에서 나타나는 압력 변화의 가장 큰 특징은 주입에 따른 공극 유체 압력이 시간의 경과에 따라 2단계 반응 양상을 보여주는 데, 주입 초기에는 주입정으로부터 상승하는 압력이 주입정으로부터 먼 거리로

점차 확산되어 가는 양상을 보여 준다. 이 때, 염수 주입의 경우 닫힌 경계부까지 압력 전파에 소요되는 시간은 Kuiper (1974)는  $\tau/SR^2 = 0.25$ 가 소요된다고 보고 하였으나, 이에 관해서는 추후 보다 정확한 검토가 필요하며, 이산화탄소를 주입하는 경우 유체 압축률의 변화에 의해 염수에 비해 더 오랜 시간이 소요된다. 일단 공극 유체압력의 전파 단계가 끝나면 이후 공극의 유체압력은 저장층 전역에 걸쳐 시간(t)에 대해 선형적으로 상승하게 되며, 이 때 시간에 대한 압력 변화율은 저장층 전체의 겉보기 압축율(bulk compressibility)과 총 공극의 부피에 반비례하는 양상을 보여준다. 저장층의 유체 압력이 전역적으로 상승하는 압축 단계에서는 염수 주입의 경우 거리에 따른 압력구배가 시간의 경과에 관계없이 일정하게 유지되며 압축에 의해서 공극 유체 압력이 상승하는 반면, 이산화탄소 주입의 경우 가스상의 이산화탄소가 점차 확장해 감에 따라 유동성을 증가시키게 된다. 이러한 유동성의 변화는 대개의 경우 압력구배를 감소시켜 궁극적으로는 염수 주입의 경우 보다 주입정 부근에서의 압력 부하를 낮추는 결과로 이어진다.

이와 같이 닫힌 경계를 가지는 저장층에서 유체를 장기적으로 주입하게 되면 저장층 내 유체 압력의 변화는 공간적 압력구배에 의한 압력 상승과 압축에 의한 저장층 전역적인 압력 상승을 유발하며 (그림 10), 이 때 어느 요인에 의한 압력 상승이 더 중

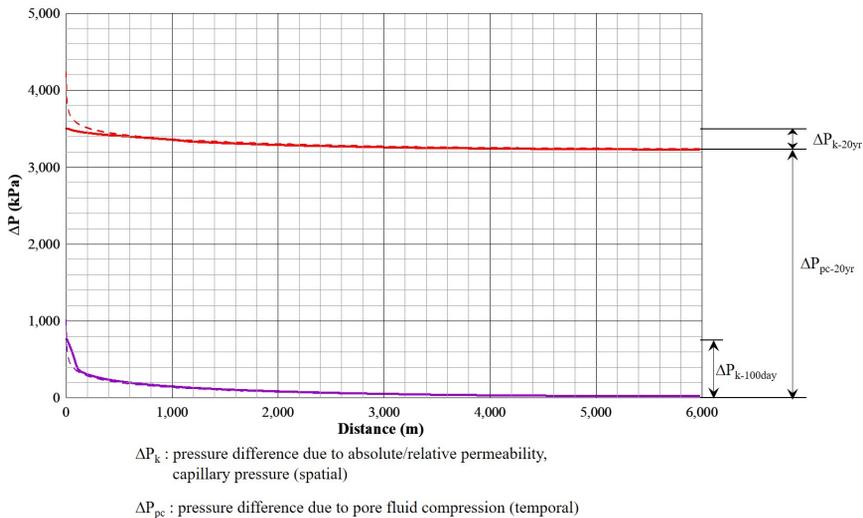


Fig. 10. The simple diagram on the mechanism of the regional pressure rise during long-term fluid injections.

요하게 작용하는 가는 저장층의 역학적 안정성 뿐만 아니라 경제성의 문제까지 야기할 개연성이 크다. 따라서 이산화탄소 지중저장을 위한 부지를 탐사, 선정하는 과정에서 이러한 부분에 대한 충분한 고려가 필요할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업의 일환으로 진행되는 “대규모 CO<sub>2</sub> 지중저장 후보지 잠재성 평가(GP2017-027)”의 지원으로 수행되었습니다. 이와 함께 투고된 논문에 대해 성심껏 심사해 주시고 의견을 제시해 주신 두분 심사위원들께도 감사의 말씀을 드립니다.

## REFERENCES

- Azizi, E. and Cinar, Y., 2013, A new mathematical model for predicting CO<sub>2</sub> injectivity. *Energy Procedia*, 37, 3250-3258, <https://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.212>.
- Birkholzer, J.T., Oldenburg, C.M. and Zhou, Q., 2015, CO<sub>2</sub> migration and pressure evolution in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 203-220, <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.03.022>.
- Bosshart, N.W., Azzolina, N.A., Ayash, S.A., Peck, W.D., Gorecki, C.D., Ge, J., Jiang, T. and Dotzenrod, N.W., 2018, Quantifying the effects of depositional environment on deep saline formation CO<sub>2</sub> storage efficiency and rate. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 69, 8-19, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.12.006>.
- Buckley, S.E. and Leverett, M.C., 1942, Mechanism of Fluid Displacement in Sands. *Transactions of the AIME*, 146, <https://dx.doi.org/10.2118/942107-G>.
- Buscheck, T.A., Bielicki, J.M., White, J.A., Sun, Y., Hao, Y., Bourcier, W.L., Carroll, S.A. and Aines, R.D., 2016a, Pre-injection brine production in CO<sub>2</sub> storage reservoirs: An approach to augment the development, operation, and performance of CCS while generating water. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, 499-512, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.04.018>.
- Buscheck, T.A., White, J.A., Carroll, S.A., Bielicki, J.M. and Aines, R.D., 2016b, Managing geologic CO<sub>2</sub> storage with pre-injection brine production: a strategy evaluated with a model of CO<sub>2</sub> injection at Snøhvit. *Energy & Environment Sciences*, 9, 1504-1512, <https://DOI:10.1039/c5ee03648h>.
- Cihan, A., Birkholzer, J.T. and Bianchi, M., 2015, Optimal well placement and brine extraction for pressure management during CO<sub>2</sub> sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 42, 175-187, <https://DOI:10.1016/j.ijggc.2015.07.025>.
- Ellsworth, W.L., 2014, Injection-Induced Earthquakes. *Science*, 341, <https://dx.doi.org/10.1126/science.1225942>.
- Healy, J.H., Rubey, W.W., Griggs, D.T. and Raleigh, C.B., 1968, The Denver Earthquakes. *Science* 161, 1301-1310, <https://dx.doi.org/10.1126/science.161.3848.1301>.
- Jenkins, C.R., Cook, P.J., Ennis-King, J., Undershultz, J., Boreham, C., Dance, T., De Caritat, P., Etheridge, D.M., Freifeld, B.M., Hortle, B.M., Kirste, A., Paterson, D., Pevzner, L., Schacht, R., Sharma, U., Stalker, S. and Urosevic, L.M., 2012, Safe storage and effective monitoring of CO<sub>2</sub> in depleted gas fields. *PNAS*, 109, E35-E41, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1107255108>.
- Kim, Y., Lee, K., Jo, S., Kim, M., Kim, J-S. and Park, M-H., 2012, A Preliminary Evaluation on CO<sub>2</sub> Storage Capacity of the Southwestern Part of Ulleung Basin, Offshore, East Sea, *Economic Environmental Geology*, 45, 41-48 (in Korean with English abstract).
- Kolster, C., Agada, S., MacDowell, N. and Krevor, S., 2018, The impact of time-varying CO<sub>2</sub> injection rate on large scale storage in the UK Bunter Sandstone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, 77-85.
- Kwon, Y.K. and Shinn Y.J., 2018, Suggestion for Technology Development and Commercialization Strategy of CO<sub>2</sub> Capture and Storage in Korea. *Economic Environmental Geology*, 51, 381-392, <https://dx.doi.org/10.9719/EEG.2018.51.4.381> (in Korean with English abstract).
- Kuiper, L.K., 1972, Drawdown in a Finite Circular Aquifer with Constant Well Discharge. *Water Resources Research*, 8, 734-736, <https://doi.org/10.1029/WR008i003p00734>.
- Lee, C., Shinn, Y.J. and Ryu, I.C., 2016, Development of regional uplift and uplift-related strata in Gunsan Basin, Yellow Sea: implications for Cenozoic crustal extension. *International Geology Review*, 58, 2029-2045, <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2016.1202151>.
- Lee, H., Shinn, Y.J., Ong, S.H., Woo, S.W., Park, K.G., Lee, T.J. and Moon, S.W., 2017, Fault reactivation potential of an offshore CO<sub>2</sub> storage site, Pohang Basin, South Korea. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 152, 427-442, <https://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2017.03.014>.
- Lee, K.K., Ellsworth, W.L., Giardini, D., Townend, T., Ge, S., Shimamoto, T., Yeo, I-W., Kang, T-S., Rhie, J., Sheen, D-H., Chang, C., Woo, J-U. and Langenbruch, C., 2019, Managing injection-induced seismic risks. *Science*, 364, 730-732, <https://dx.doi.org/10.1126/science.aax1878>.
- Lemmon, E.W., McLinden, M.O. and Friend, D.G., 2019, Thermophysical Properties of Fluid Systems in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database

- Number 69 (eds.). P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899 (July 16, 2019), <https://doi.org/10.18434/T4D303>.
- Lin, Y.-C., Yang, S.-Y., Fen, C.-S. and Yeh, H.-D., 2016, A general analytical model for pumping tests in radial finite two-zone confined aquifers with Robin-type outer boundary. *Journal of Hydrology*, 540, 1162-1175, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.028>.
- Liu, J., Yu, X. and Zhao, J., 2013, Numerical Simulation of Geostress and Pore Pressure Evolution around Oil or Water Well under Different Injection-Production Ratio. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013(4), <http://dx.doi.org/10.1155/2013/604748>.
- Mathias, S.A., de Miguel, G.J.G.M., Thatcher, K.E. and Zimmerman, R.W., 2011a, Pressure Buildup During CO<sub>2</sub> Injection into a Closed Brine Aquifer. *Transport in Porous Media*, 89, 383-397, <https://dx.doi.org/10.1007/s11242-011-9776-z>.
- Mathias, S.A., Gluyas, J.G., de Miguel, G.J.G.M. and Hosseini, S.A., 2011b, Role of partial miscibility on pressure buildup due to constant rate injection of CO<sub>2</sub> into closed and open brine aquifers. *Water Resources Research*, 47, <https://dx.doi.org/10.1029/2011WR011051>.
- Mijic, A., LaForce, T.C. and Muggeridge, A.H., 2014, CO<sub>2</sub> injectivity in saline aquifers: The impact of non-Darcy flow, phase miscibility, and gas compressibility. *Water Resources Research*, 50, 4163-4185, <https://dx.doi.org/10.1002/2013WR014893>.
- Mildren, S.D., Hillis, R.R., Dewhurst, D.N., Lyon, P.J., Meyer, J.J. and Boulton, P.J., 2005, FAST: A new technique for geomechanical assessment of the risk of reactivation-related breach of fault seals. in P. Boulton and J. Kaldi (eds.) *Evaluating fault and cap rock seals: AAPG Hedberg Series*, no. 2, 73-85.
- Onder, H., 1994, Determination of aquifer parameters of finite confined aquifers from constant drawdown non-steady type-curves. *Hydrological Sciences Journal*, 39, 269-280, <https://doi.org/10.1080/02626669409492743>.
- Park, K.-S., Lee, H.-Y., Kang, D.-H. and Shin, W.-C., 2010, Structural development and geological age of rocks in the Gunsan Basin, Yellow Sea: a perspective from seismic data interpretation. *Journal of Geological Society of Korea*, 46, 577-593 (in Korean with English abstract).
- Park, Y.J., Kang, N.K., Yi, B.Y. and Yoo, D.G., 2015, Origin and Distribution of Cut and Fill Structures in the Southwestern Margin of Ulleung Basin, East Sea. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 18, 39-53, <https://dx.doi.org/10.7582/GGE.2015.18.2.039> (in Korean with English abstract).
- Pruess, K., 2005, ECO2N: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO<sub>2</sub>. LBNL-57952, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, <https://dx.doi.org/10.2172/877331>.
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., 1999, TOUGH2 User's guide. Version 2, LBNL-43134,0, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, <https://dx.doi.org/10.2172/751729>.
- Shinn, Y.J., 2015, Geological structures and controls on half-graben inversion in the western Gunsan Basin, Yellow Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 68, 480-491, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.09.013>.
- Shinn, Y.J., Chough, S.K. and Hwang, I.G., 2010, Structural development and tectonic evolution of Gunsan Basin (Cretaceous/Tertiary) in the central Yellow Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 500-514, <https://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.11.001>.
- Song, C.W., Son, M., Sohn, Y.K. and Shin, Y.J., 2015, A study on potential geologic facility sites for carbon dioxide storage in the Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 51, 53-66, <https://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2015.51.1.53>.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage, *Transactions. American Geophysical Union*, 16, 519-524, <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>.
- Tian, T., Yang, Z., Jung, B., Joodaki, S., Erlström, M., Zhou, Q. and Niemi, A., 2016, Integrated simulations of CO<sub>2</sub> spreading and pressure response in the multi-layer saline aquifer of South Scania Site, Sweden. *Greenhouse Gases Science and Technology*, 5, 1-15, <https://dx.doi.org/10.1002/ghg.1583>.
- Williams, G.A., Chadwick, R.A. and Vosper, H., 2018, Some thoughts on Darcy-type flow simulation for modelling underground CO<sub>2</sub> storage, based on the Sleipner CO<sub>2</sub> storage operation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, 164-175, <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.11.010>.
- Zhou, Q., Birkholzer, J.T., Tsang, C.F. and Rutqvist, J., 2008, A method for quick assessment of CO<sub>2</sub> storage capacity in closed and semi-closed saline formations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2, 626-639, <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.02.004>.

---

Received : August 2, 2019

Revised : August 22, 2019

Accepted : August 24, 2019