

폐공을 통한 염수 및 이산화탄소 누출 평가 수치 모델링

김중휘

중원대학교 신재생에너지자원학과

요 약

이산화탄소 지중 주입 시에 기존에 존재하는 폐공 또는 폐공 처리된 이산화탄소 주입정을 통하여 발생할 수 있는 염수 및 이산화탄소의 누출 양상을 정량적으로 예측 및 분석하기 위하여 저장 대수층 및 폐공을 연계한 다 상 유체 유동 수치 모델링을 수행하였고 폐공의 고유투수계수 변화에 따른 일련의 민감도 분석을 수행하였다. 기존의 폐공이 존재하는 경우 염수의 누출은 이산화탄소 주입에 의한 압력 증가에 따라서 급격하게 발생하며, 이산화탄소가 폐공 하부에 도달한 이후부터 염수의 누출률은 감소하는 반면 이산화탄소의 누출률은 크게 증가한다. 이산화탄소 주입이 종료된 이후에도 이산화탄소는 일정한 누출률을 가지며 지속적으로 누출된다. 폐공 처리된 이산화탄소 주입정이 누출 경로로 작용하는 경우 염수의 누출은 상대적으로 짧은 기간 동안 나타나며, 이산화탄소는 곧바로 누출되기 시작하여 일정한 누출률을 가지며 지속적으로 누출된다. 두 경우 모두 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 염수와 이산화탄소 모두의 누출률의 최대값이 증가하고 누출이 발생하는 시점이 더 빨라진다. 이러한 수치 모델링 결과들은 이산화탄소 지중 저장 대상 지층 시스템의 밀봉 능력 분석과 이에 따른 이산화탄소 저장의 누출 위험도 및 위험도 평가 시에 합리적이고 실용적인 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 이산화탄소 지중 저장, 염수 누출, 이산화탄소 누출, 폐공, 수치 모델링

Jung-Hwi Kihm, 2017, Numerical modeling of evaluation of Brine and Carbon Dioxide leakage through an abandoned well. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 2, p. 291-301

ABSTRACT: Multi-phase fluid flow numerical modeling integrating a storage formation with an abandoned well are performed to predict and analyze quantitatively leakage behaviors of brine and carbon dioxide, which may occur through existing abandoned well or closed injection well. A series of sensitivity analyses is also carried out according to the changes in permeability of the abandoned well. When an abandoned well exist, brine leakage occurs rapidly with increasing pressure due to the injection of carbon dioxide. After the carbon dioxide reaches at the bottom of the abandoned well, brine leakage rate decreases, while leakage rate of carbon dioxide increases significantly. Carbon dioxide leaks continuously with a constant leakage rate, even after the end of the carbon dioxide injection. When the closed injection well acts as a leakage path, brine leakage appears for a relatively short period of time, and carbon dioxide leaks continuously with a constant leakage rate. In both cases, as permeability of the abandoned well increases, the maximum leakage rates of brine and carbon dioxide increase, and starting points of leakage are more faster. It is expected that these numerical modeling results can be used as a reasonable and practical guideline to analyze the sealing capacity of the target formation system and the leakage hazard and risk assessments for the geologic carbon dioxide storage.

Key words: geologic carbon dioxide storage, brine leakage, carbon dioxide leakage, abandoned well, numerical modeling

(Jung-Hwi Kihm, Department of Renewable Energy and Resources, Jungwon University, Goesan-Gun 28024, Republic of Korea)

‡ Corresponding author: +82-43-830-8781, E-mail: jung0209@jwu.ac.kr

1. 서 론

이산화탄소 지중 저장(geologic carbon dioxide storage)은 전지구적 기후 변화의 주범으로 지목되고 있는 이산화탄소의 배출량을 처리 용량과 비용의 측면에서 효율적으로 감축할 수 있는 방법으로 평가되고 있다(Holloway, 1997; Metz *et al.*, 2005). 이산화탄소 지중 저장을 위해서는 대상 지층 시스템의 3대 성능 즉 주입, 저장 및 밀봉 성능의 분석과 예측이 선행되어야만 하며, 특히 밀봉 성능과 관련하여 이산화탄소의 누출 양상을 정량적으로 파악하고 이를 바탕으로 누출에 대한 위험도를 분석하는 것이 필수적이다.

지중 저장을 목적으로 대상 지층에 주입된 이산화탄소의 누출 경로는 (1) 이산화탄소 압력의 과잉 증가로 낮은 투수성을 가진 덮개암의 모세관 장벽(capillary barrier)을 통과하여 상부로 누출, (2) 덮개암의 퇴적학적 틈새, 단열 시스템 또는 단층을 통하여 누출, (3) 기존의 폐공 등과 같이 인위적으로 형성된 통로로 누출 등이 대표적이다(Metz *et al.*, 2005; Oldenburg *et al.*, 2009). 이 중에서 폐공은 기존에 존재하였던 폐공뿐만 아니라 이산화탄소 지중 저장 사업에서 조사 목적으로 신규로 발생한 폐공들이 포함되며, 심지어 이산화탄소 주입정 역시도 주입 종료 이후에는 누출의 통로로 작용할 가능성이 높은 폐공으로 볼 수 있다. 이러한 인위적인 요인들은 단층 등의 자연적 요인과는 다르게 이산화탄소 지중 저장 사업의 계획 및 설계 단계에서 그 존재 여부를 결정할 수 있는 누출 경로이기 때문에 정책 결정 과정에 필요한 기초 자료를 제공한다는 측면에서 해당 폐공 등을 통한 이산화탄소 누출 양상을 파악하는 것이 더욱 중요하다.

한편 이산화탄소의 지중 주입은 필연적으로 대상 대수층 내 유체 압력의 증가를 유발하게 되는데 이때 음용수로 사용할 수 없는 심부의 염수(brine) 또는 지하수가 증가된 압력에 의하여 이산화탄소의 주요 누출 경로를 통해 상부로 이동할 수 있다(Metz *et al.*, 2005; Oldenburg *et al.*, 2009; NETL, 2013). 이렇게 상부로 이동한 염수는 상부의 대수층에 유입되어 지하수 자원을 제공하는 천부 대수층의 수질을 악화시킬 수 있다. 따라서 이산화탄소 지중 저장 시에 이산화탄소의 누출뿐만 아니라 주입 대상 지층의 염수(지층 내 기존의 지하수)의 누출 역시 중요하게

고려되어야만 한다.

국외에서는 이러한 폐공을 통한 염수 및 이산화탄소의 누출에 대한 다양한 연구들이 진행된 바 있다(Oldenburg and Lewicki, 2006; Stauffer *et al.*, 2006, 2011; Viswanathan *et al.*, 2008; Oldenburg *et al.*, 2009). 이러한 연구들은 먼저 대상 저장층 내에 주입된 이산화탄소의 거동을 동적 모델(예, TOUGH2, STOMP, CMG-GEM)을 통하여 예측한 후에 예측된 이산화탄소 플룸의 분포 및 특성을 이용하여 폐공으로의 누출을 정량적으로 분석하였다. 이것은 복잡한 계산을 요구하는 이산화탄소 거동 예측 모델과 비교적 간단한 분석해 또는 수치 모델(예, Princeton wellbore release model; Nordbotten *et al.*, 2005)로 표현되는 폐공 내의 유체 누출 모델의 결합을 통하여, 즉 복수의 수치 모델의 연계를 통하여 이루어졌다.

한편 국내에서는 이러한 염수 및 이산화탄소의 누출에 대한 연구가 일부 연구자들을 중심으로 제한적으로 이루어지고 있으며, 국외에서 개발된 모델의 비공개성으로 인하여 직접적으로 적용하기 어려운 실정에 있다. 이러한 상황에서 Kim *et al.* (2012)에 의해 이산화탄소 지중 저장에 의한 염수 및 이산화탄소 누출의 확률론적 평가를 위한 모델인 CO2-LEAK (Kim *et al.*, 2012)가 제안되었고 이를 국내 퇴적 분지의 특성을 반영한 가상의 영역에 적용한 연구(Kim, 2012)가 진행된 바 있다. 이 모델은 기본적으로 이산화탄소 거동 예측을 담당하는 TOUGH2 (Pruess *et al.*, 1999) 수치 모델과 폐공 및 폐공에 인접한 천부 대수층의 유체 유동을 계산하는 간단한 모델(Nordbotten *et al.*, 2005, 2006)을 연계한 것이다. 그러나 이 모델 역시 국외의 연구들과 유사하게 개별 모델의 결과들이 한 방향으로만 연동되며, 폐공 내에서 염수와 이산화탄소의 혼합 유체가 단상의 유체로 거동하는 모델에 기반하였기 때문에 한계를 가지고 있다. 따라서 폐공과 저장층이 통합적으로 연계된 조건에서 폐공 내에서 염수와 이산화탄소가 모두 유동하는 다상의 유체 유동을 고려하여 이산화탄소의 누출 양상을 좀 더 현실적으로 반영한 수치 모델링 연구가 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 이산화탄소 지중 주입 시에 기존에 존재하는 폐공 또는 폐공 처리된 이산화탄소 주입정을 통하여 발생할 수 있는 염수 및 이산화탄소의

누출 양상을 정량적으로 예측 및 분석하는 것이다. 이를 위하여 저장 대수층 및 폐공을 연계한 다상 유체 유동 수치 모델링을 수행하였고 폐공의 고유투수계수 변화에 따른 일련의 민감도 분석을 수행하였다.

2. 수치 모델링 개요

이산화탄소 지중 주입 시 폐공을 통한 염수 및 이산화탄소의 누출 양상 및 누출량을 정량적으로 예측 및 분석하기 위하여 열-수리학적 수치 모델링을 수행하였다. 본 연구에 사용된 다상 열-수리학적 수치 모델은 TOUGH2 (Pruess *et al.*, 1999)이며, 이산화

탄소 지중 저장 환경에서의 이산화탄소 및 지하수 유체 특성을 합리적으로 고려할 수 있도록 ECO2N (Spycher and Pruess, 2005) 모듈을 사용하였다. 해당 모듈을 사용하여 유체 압력 및 온도에 따른 이산화탄소 및 염수에 대한 밀도와 동적점성계수 등의 물성 변화가 고려되었다.

수치 모델링 대상 저장 대수층은 두께가 50 m이고 가로 및 세로가 20,000 m인 영역을 고려하였으며, 지표로부터 1,450~1,500 m 심도에 위치하고 있다 (그림 1). 대수층은 상부와 하부가 덮개암으로 둘러싸여 있으며, 영역의 중심에 이산화탄소 주입정이 설치되어 있다. 사암 대수층은 총 15,680개의 삼차원

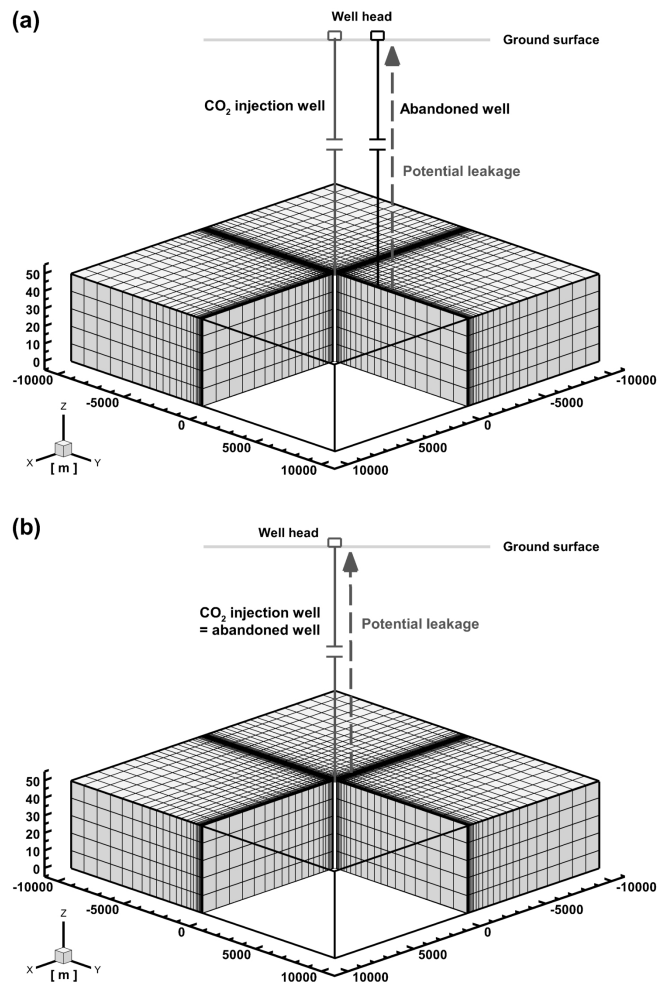


Fig. 1. Schematic diagram of the aquifer (modeling domain) and grid elements with (a) CO₂ injection well and abandoned well, and (b) CO₂ injection well abandoned after CO₂ injection period. The vertical coordinate axis z is exaggerated 100 times.

Table 1. Representative thermo-hydrological properties of the aquifer.

Property	Value
Porosity [%]	5.0
Intrinsic permeability [m ²]	1.020×10^{-14}
Solid density [kg/m ³]	2.675×10^3
Specific heat [J/kg·°C]	915.0
Heat conductivity [W/m·°C]	2.720
Residual water saturation	0.150
Residual gas saturation	0.050
van Genuchten's (1980) hydraulic parameters	
Gas-entry pressure [Pa]	1.887×10^4
Exponent	0.457

격자로 이산화되었으며, 격자의 수평 길이는 주입정 주변의 1 m에서 주입정으로부터 멀어지면서 1,000 m까지 점차적으로 증가한다. 폐공은 두 가지 경우를 고려하였는데 먼저 주입정으로부터 500 m 떨어진 지점에 폐공이 존재하는 경우와(그림 1a) 주입 종료 후 주입정이 폐공 처리되어 누출의 경로로서 작용하는 경우(그림 1b)이다. 이러한 두 종류의 폐공은 직경이 75 mm이며, 수직적으로 연결된 일차원의 32개의 격자 조합으로 구성되어 지층 최상부로부터 지표까지 연결되어 있다.

여러 문헌들(van Genuchten, 1980; Carsel and Parrish, 1988; KIGAM, 2005; Kim, 2009)을 수집 및 분석하여 국내 육상 분지 내 저장 유망 대수층의 열적 및 수리학적 특성에 대한 대표값을 산정하였으며, 이를 수치 모델링에 적용하였다. 대상 대수층의 열적 및 수리학적 특성은 균질하고 등방성을 가지는 것으로 가정하였고 표 1에 정리되어 있다. 한편 폐공에 대해서는 폐공 내 물질이 등다공성매체(EPM, Equivalent Porous Media)로 작용함을 가정하였고 기존의 이산화탄소 누출 평가 관련 문헌들(Viswanathan *et al.*, 2008; Oldenburg *et al.*, 2009; Stauffer *et al.*, 2011)을 참고하여 5% 내외의 공극률과 $1.0 \times 10^{-13} \sim 1.0 \times 10^{-17}$ m²의 고유투수계수를 가지는 것으로 설정하였다.

지중 유체 압력의 초기 조건은 심도를 고려하여 수치 모델링 영역의 윗면에서 1.43×10^7 Pa의 압력이 주어질 때 정수압 상태의 압력을 각각의 격자에 부여하였다. 지온의 초기 조건은 우리나라의 평균 지온 구배 0.0256°C/m와(KIGAM, 2005) 지표 온도 15.0°C를 고려하여 수치 모델링 영역의 윗면과 바다

면에서 각각 52.12°C와 53.40°C가 수직 방향으로 선형적으로 분포하는 조건을 부여하였다.

이산화탄소의 주입 위치는 수치 모델링 영역의 중심에서 하부의 20 m 구간에서 이루어지며, 약 34°C의 이산화탄소를 2.0 kg/s (0.063 Mton/year)의 속도로 10년간 주입하였다. 따라서 주입된 총 이산화탄소의 질량은 0.63 Mton이다. 수치 모델링 기간은 주입 기간 10년을 포함하여 총 100년을 수행하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 폐공에 대해 두 가지 경우를 고려하였는데 첫 번째는 기존에 존재하는 폐공이 주입정으로부터 500 m의 이격 거리를 가지고 위치하는 경우(Case A)이다. 이 경우에 이산화탄소 주입에 따른 압력 증가 감소와 다상 유체 이동의 특성에 따라서 폐공을 통한 염수 및 이산화탄소의 누출이 발생한다. 두 번째는 이산화탄소를 10년간 주입한 후에 주입정을 바로 폐공 처리한 경우(Case B)이다. 이 경우에 주입 기간 10년이 지난 후 시점부터 주입정이 폐공 내 물질로 채워지게 되고 이 폐공을 따라서 염수 또는 이산화탄소의 누출이 발생한다. 기존의 폐공을 통한 누출 분석 연구들에서 누출량 및 누출률이 폐공의 고유투수계수에 큰 영향을 받음을 보여주었기 때문에 본 연구에서는 1.0×10^{-13} (Case A-1 or Case B-1) ~ 1.0×10^{-17} (Case A-5 or Case B-5) m²의 범위에서 각각 다섯 가지 경우를 고려하였다.

3. 염수 및 이산화탄소 누출 수치 모델링 결과

3.1 기존의 폐공을 통한 누출 수치 모델링 결과(Case A)

주입정으로부터 500 m 이격 거리를 가지는 기존

의 폐공이 존재하는 경우에 대한 수치 모델링 결과가 그림 2와 3에 도시되어 있다. 주입정과 폐공을 가로지르는 단면(y-z)에서의 이산화탄소 포화도의 변화가 대표적인 경우로 Case A-1에 대해서 그림 2에 도시되어 있으며, 폐공에 연결된 저장 지층의 압력 및 이산화탄소 포화도가 그림 3a 및 그림 3b에 각각 표현되어 있다. 주입된 이산화탄소는 주입 구간(주입 지층 하부 20 m 구간) 주변을 채우는 동시에 부력에 의해서 상부로 이동하고 상부에서 덮개암을 만나면 측면으로 이동하여 동심원상으로 확장되는 양상을 보여준다(그림 2). 주입된 이산화탄소와 증가한 유체 압력에 의하여 염수는 주입정으로부터 바깥 방향으로 수평적으로 밀려나며, 이러한 압력 증가의 전파에 의해 폐공을 통한 염수의 누출이 일어나게 된다. 이산화탄소가 폐공 위치까지 확산되면(그림 2d) 이산화탄소의 누출이 발생하게 되고 시간이 지남에 따라 용해 포획 등으로 이산화탄소의 포화도는 점차 감소하지만 100년 이후에도(그림 2f) 여전히 폐공 하부에 이산화탄소가 분포하여 지속적인 누출이 일어나게 된다.

이산화탄소 주입이 진전됨에 따라서 폐공과 연결된 저장 지층 내 유체 압력은 1년간 초기에 급격하게 증가하다가 이후에 점진적으로 증가하는 양상을 보여준다(그림 3a). 주입이 종료된 이후 유체 압력은 급격하게 감소하고 점차적으로 초기의 정상 상태로

회복된다. 이산화탄소는 주입정에서 폐공 위치까지 이동하는 데 시간이 소요되어 3년 후부터 이산화탄소 포화도가 0.0 이상으로 급격히 증가하며, 주입이 종료된 이후에도 주입정 주변의 이산화탄소가 지속적으로 수평 방향으로 확산하면서 50년 후에 약 0.58의 최대값을 보인 후 이산화탄소의 용해 포획에 의해 점차적으로 감소하는 양상을 보여준다(그림 3b). 유체의 압력은 이산화탄소가 폐공 하부에 도착하는 3년 후 시점에서 모세관압력의 증가량만큼 단속적으로 증가하는 양상이 나타나며, 폐공의 고유투수계수 변화에 따른 압력의 차이는 거의 나타나지 않는다. 또한 이산화탄소 포화도 역시 폐공의 고유투수계수 변화에 따른 영향이 100년 이후에도 0.2% 이내의 변동만을 보여주어 거의 나타나지 않는다. 폐공과 연결된 저장 지층의 유체 압력과 온도에 대응하는 이산화탄소와 염수의 밀도는 10년 이후(주입 종료 후) 각각 702 kg/m^3 , $1,025 \text{ kg/m}^3$ 이고 100년 후에는 압력이 감소함에 따라서 각각 661 kg/m^3 , $1,022 \text{ kg/m}^3$ 이 되며, 이러한 밀도의 차이는 지속적인 이산화탄소 누출의 원동력이 된다.

염수의 누출은 이산화탄소 주입이 시작되고 압력이 증가함에 따라서 급격하게 발생하며, 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 염수 누출률의 최대값이 증가하고 누출률이 급격하게 증가하는 시점이 더 빠르게 나타난다(그림 3c). 주입정으로부터 이동한 이

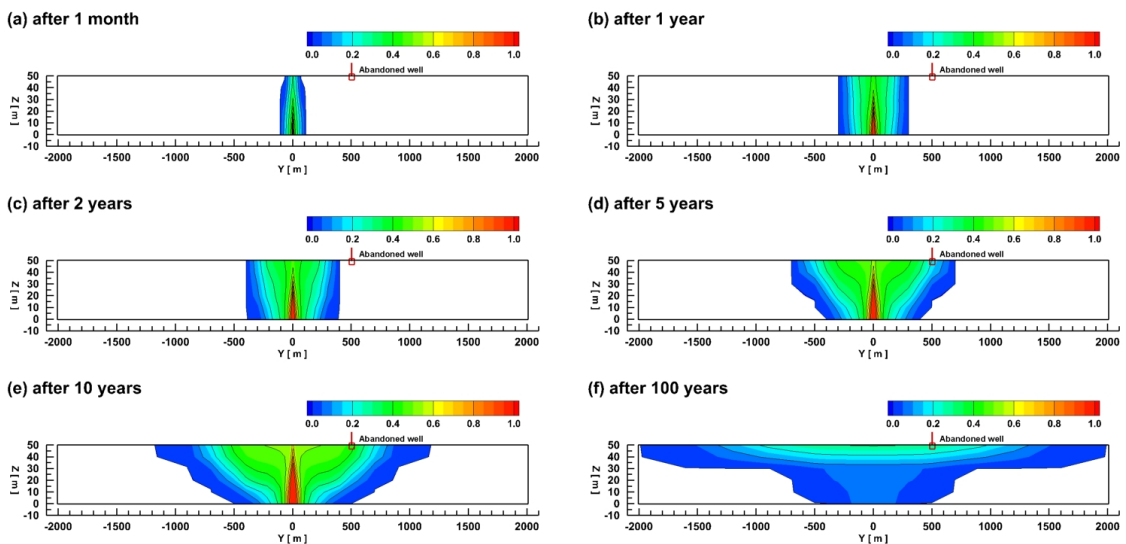


Fig. 2. Spatial distribution of CO₂ saturation on the y-z plane for Case A-1 after (a) 1 month, (b) 1 year, (c) 2 years, (d) 5 years, (e) 10 years, and (f) 100 years. The vertical coordinate axis z is exaggerated 10 times.

산화탄소가 폐공 하부에 도달한 이후에는 폐공을 통하여 이산화탄소가 급격하게 누출되며, 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 이산화탄소 누출률의 최대값이 증가하고 누출이 시작되는 시점이 더 빠르게 나타난다(그림 3d). 이산화탄소의 누출이 발생한 후에는 염수의 누출이 급격하게 감소하여 이후에는 거의 누출이 일어나지 않는다. 특히 폐공의 고유투수

계수가 가장 큰 경우에서(Case A-1) 염수의 누출률은 이산화탄소가 폐공 하부에 도달하는 시점부터 급격하게 감소하는 양상(그림 3c)을 보여주는 반면 이산화탄소의 누출률은 최대값을 보이며 상승하고 주입 기간이 끝난 이후 급격히 감소하다가 다시 회복되어 일정한 누출률을 보여준다(그림 3d).

폐공을 통한 염수의 누적 누출량은 대수층의 압

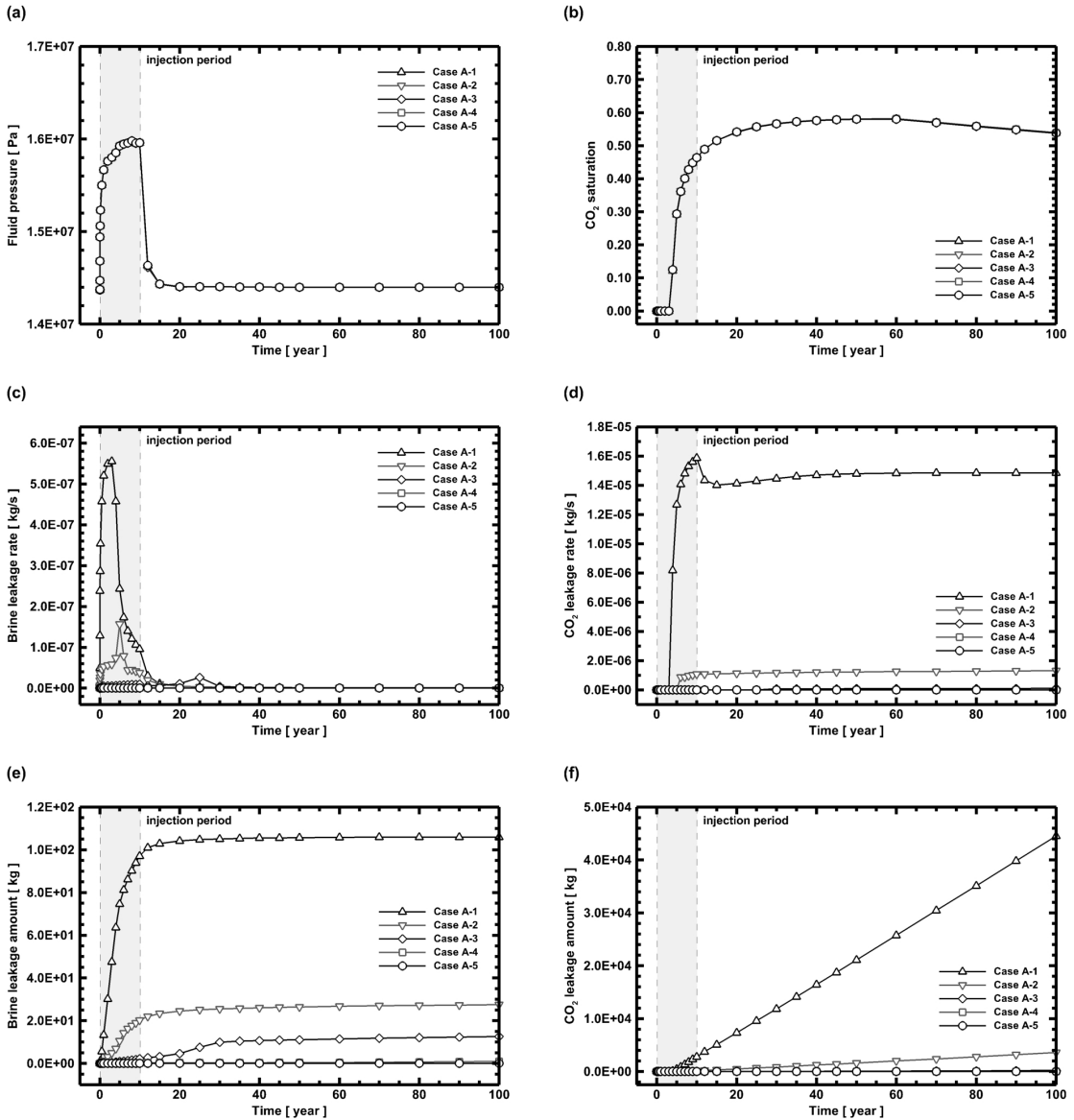


Fig. 3. Temporal changes in (a) fluid pressure and (b) CO₂ saturation at the storage formation connected with the abandoned well, and (c) brine (groundwater) leakage rate, (d) CO₂ leakage rate, (e) cumulative amount of brine leakage, and (f) cumulative amount of CO₂ leakage through the abandoned well. Gray shaded area with dashed line indicates injection period of 10 years.

력 증가와 함께 증가하고 이산화탄소의 누출이 시작된 이후에는 누출률이 거의 0이 되어 변화가 발생하지 않으며, 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 누적 누출량의 최대값은 증가하고 최종적인 누출량에 도달하는 시점은 빨라진다(그림 3e). 폐공을 통한 이산화탄소의 누적 누출량은 시간에 따라서 지속적으로 증가하며, 누출률에 비례하여 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 더 많이 누출된다(그림 3f). 폐공의 고유투수계수가 가장 큰 경우(Case A-1) 염수의 최대 누출량은 약 106 kg으로 대수층 전체의 초기 염수량 1.00×10^{12} kg에 비해 0.106 ppb로 매우 작은 량이다. 한편 이산화탄소의 100년 후 누적 누출량은 약 44,499 kg으로 주입된 이산화탄소 총량 6.30×10^8 kg에 비해 0.007%로 역시 매우 작은 량이다.

3.2 폐공 처리된 이산화탄소 주입정을 통한 누출 수치 모델링 결과(Case B)

주입 종료 후 폐공 처리된 이산화탄소 주입정이 누출 경로로 작용하는 경우에 대한 수치 모델링 결과가 그림 4에 도시되어 있다. 먼저 폐공(주입정)에 연결된 저장 지층의 압력 및 이산화탄소 포화도가 그림 4a 및 그림 4b에 각각 표현되어 있다. 유체 압력은 주입 종료된 이후 급격하게 감소하고 점차적으로 초기의 정상 상태로 회복된다(그림 4a). 이산화탄소 포화도는 주입 구간의 하부에서 주입된 이산화탄소가 폐공 하부까지 부력에 의해 상승함에 따라서 주입 종료 후에도 소폭 상승하여 40년 후에 약 0.67의 최대값을 보인 후 이산화탄소의 수평 방향 확산 및 용해 포화에 의해 점차적으로 감소하는 양상을 보여준다(그림 4b). 기존에 존재하는 폐공의 경우(Case A)와 마찬가지로 폐공의 고유투수계수 변화에 따른 유체 압력 및 이산화탄소 포화도의 변동이 매우 좁은 폭에서 나타난다. 폐공(주입정)과 연결된 저장 지층의 유체 압력과 온도에 대응하는 이산화탄소와 염수의 밀도는 10년 이후(주입 종료 후) 각각 719 kg/m^3 , $1,026 \text{ kg/m}^3$ 이고 100년 후에는 압력이 감소함에 따라서 각각 661 kg/m^3 , $1,022 \text{ kg/m}^3$ 이 되며, 이러한 밀도의 차이는 지속적인 이산화탄소 누출의 원동력이 된다.

염수의 누출은 이산화탄소 주입 종료 후 압력이 초기의 정상 상태로 회복되는 구간 동안 존재하는 압력 증가량에 의해 상대적으로 짧은 기간 동안 나

타나며, 기존에 존재하는 폐공의 경우(Case A)와 마찬가지로 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 염수 누출률의 최대값이 증가하고 누출률이 급격하게 증가하는 시점이 더 빠르게 나타난다(그림 4c). 반면 이산화탄소의 경우 주입 종료 후에도 폐공 처리된 주입정 하부에 이산화탄소가 충분히 존재하기 때문에 이산화탄소가 급격히 누출되며, 누출률의 증가는 점차적으로 완화되어 100년 이내에 일정한 값에 도달한다(그림 4d). 또한 최종적으로 도달한 누출률이 기존에 존재하는 폐공의 경우(Case A)에서 폐공의 고유투수계수가 같은 경우에 대해 각각 거의 같은 누출률을 가짐을 보여준다.

폐공 처리된 주입정을 통한 염수의 누적 누출량은 염수 누출률이 존재하는 기간 동안 증가하여 최종적으로는 거의 일정한 값에 도달하며, 기존에 존재하는 폐공의 경우(Case A)와 마찬가지로 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 누적 누출량의 최대값은 증가하고 최종적인 누출량에 도달하는 시점은 빨라진다(그림 4e). 폐공된 주입정을 통한 이산화탄소의 누적 누출량은 시간에 따라서 지속적으로 증가하며, 앞의 경우(Case A)와 유사하게 누출률에 비례하여 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 더 많이 누출된다(그림 4f). 폐공의 고유투수계수가 가장 큰 경우(Case B-1) 100년 후 염수의 누적 누출량은 약 21 kg이고 이산화탄소의 누적 누출량은 약 39,782 kg으로 앞의 경우(Case A)와 마찬가지로 각각 매우 작은 량을 보여준다.

3.3 폐공을 통한 염수 및 이산화탄소 누출에 대한 토의

수치 모델링 결과들은 염수의 경우에 이산화탄소 주입에 의한 압력 증가가 폐공을 통한 수직 방향의 누출의 주된 원인으로 작용함을 보여준다. 따라서 염수의 누출률은 폐공 하부에 연결된 지층의 압력 증가에 민감하게 변화한다. 그러나 이러한 압력의 증가가 발생한 조건하에서도(즉 주입 기간 내에서도) 이산화탄소가 폐공 하부에 도달한 이후에는 염수의 누출률이 급격하게 하락하는 현상을 보여준다. 이것은 다상 유체 유동의 특성을 보여주는 것으로 밀도가 낮은 이산화탄소가 부력에 의해 폐공을 채우면서 상부로 누출함에 따라서 염수는 압력의 구배가 존재함에도 불구하고 폐공을 통하여 유동하기가 어

려워지기 때문이다. 또한 이산화탄소의 주입이 종료된 후에는 이산화탄소 누출률이 순간적으로 감소하였다가 점차적으로 다시 증가하여 일정한 값을 보이며, 기존에 존재하는 폐공을 통하여 누출이 발생하는 경우(Case A)와 폐공 처리된 주입정을 통하여 누출이 발생하는 경우(Case B)에 최종적인 이산화탄소의 누출률이 각각 유사한 값을 보여준다. 이것은

이산화탄소의 누출이 압력 증가보다는 부력에 의하여 발생하며, 주입 기간이 지난 이후에도 장기간에 걸쳐 발생할 수 있음을 의미한다. 또한 폐공에 접한 저장 지층에 자유상 이산화탄소가 남아 있는 경우 폐공을 통하여 지속적으로 누출될 수 있으며, 이때 누출률은 폐공의 고유투수계수에 따라서 크게 좌우됨을 보여준다.

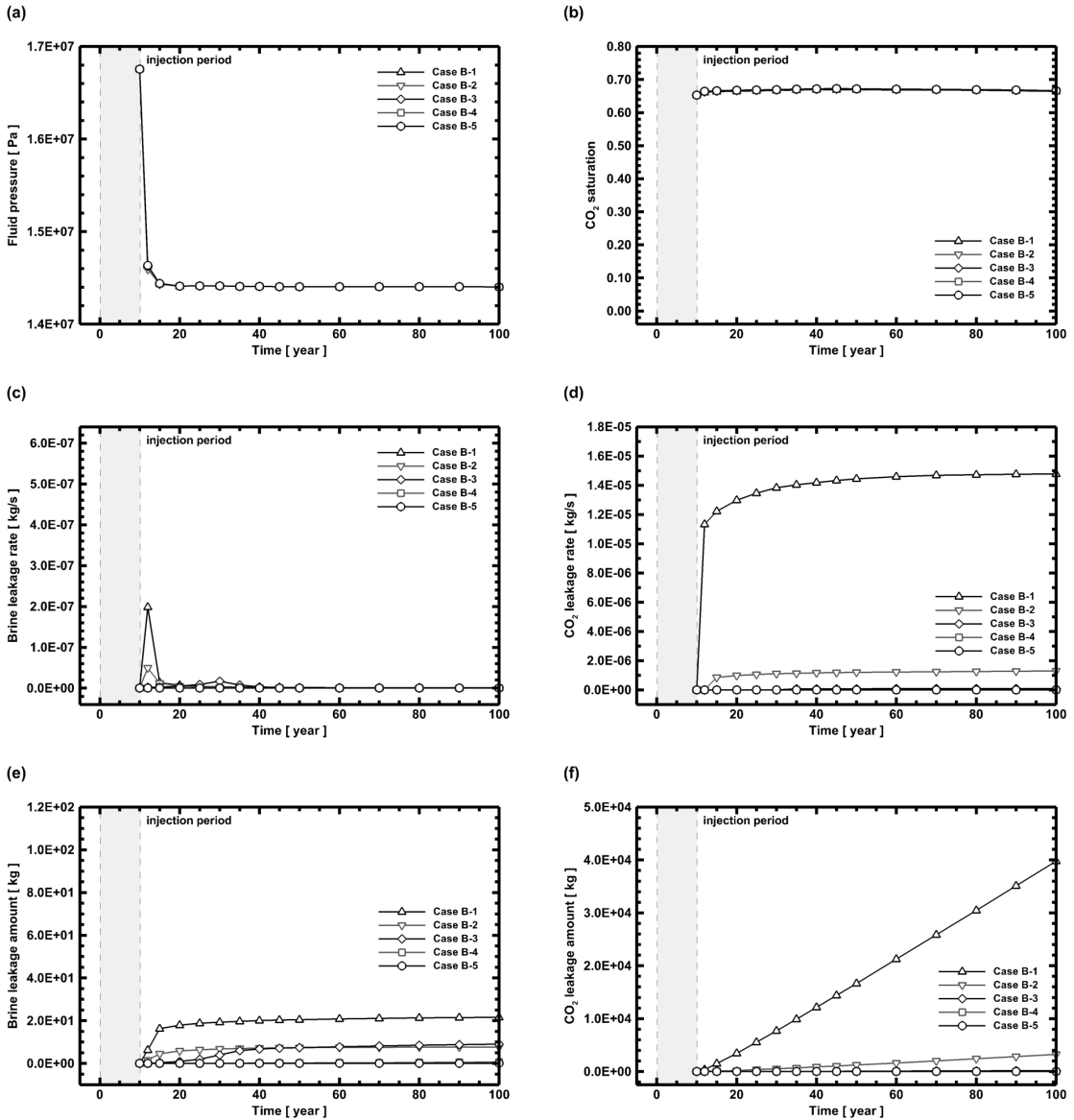


Fig. 4. Temporal changes in (a) fluid pressure and (b) CO₂ saturation at the storage formation connected with the CO₂ injection well (abandoned after injection period), and (c) brine (groundwater) leakage rate, (d) CO₂ leakage rate, (e) cumulative amount of brine leakage, and (f) cumulative amount of CO₂ leakage through the CO₂ injection well. Gray shaded area with dashed line indicates injection period of 10 years.

서론에서 언급한 기존의 연구들(Oldenburger *et al.*, 2009; Stauffer *et al.*, 2011; Kim, 2012)에서는 폐공 내부의 유체 유동이 이산화탄소와 염수의 혼합 유체로 고려된다. 이러한 영향으로 본 연구의 수치 모델링 결과와는 다르게 주입 기간 내에 이산화탄소가 폐공에 도달하여도 염수가 지하수 포화도의 비율만큼 지속적으로 누출되는 결과들을 보여준다. 또한 주입 기간이 끝나면 압력 경사가 해소되어 염수와 이산화탄소의 누출 모두 급격하게 감소하며, 두 유체 모두 낮은 누출률을 가지고 지속적으로 누출되는 결과들을 보여준다. 이것은 폐공 내에 유체 유동을 Princeton wellbore release model (Nordbotten *et al.*, 2005) 등의 단상 유체 유동에 근거한 단순한 모델을 이용하여 모사하는 경우 염수의 누출량은 과대평가가 이산화탄소의 누출량은 과소평가가 나타날 수 있으며, 특히 주입 기간 이후의 장기 예측에서 그 오차가 크게 나타날 수 있음을 의미한다. 따라서 모델의 복잡성과 이에 따른 계산 비용을 감수하더라도 다상 유체 유동을 고려하여야 할 필요성이 있으며, 향후 다상 유체 유동을 고려하는 간단한 모델을 개발하고 연동하는 연구들이 수행되어야 한다.

기존에 존재하는 폐공을 통하여 누출이 발생하는 경우(Case A)와 폐공 처리된 주입정을 통하여 누출이 발생하는 경우(Case B) 모두 폐공의 고유투수계수가 가장 높은 최악의 경우이더라도 폐공 하나만을 통한 염수 및 이산화탄소의 누출량은 기존의 대수층 내 염수의 총량 및 주입된 이산화탄소 총량에 비해서 매우 작게 나타난다. 또한 폐공의 고유투수계수가 변화해도 폐공에 연결된 저장 지층에서의 유체 압력 및 이산화탄소 포화도의 변화가 거의 나타나지 않는다. 즉 폐공 하나만을 통한 염수 및 이산화탄소의 누출은 대수층 전체에 영향을 줄만큼의 변화를 유발하기 어려우며, 현재 조건하에서는 누출의 위해도 또는 위험도 역시 낮은 것으로 평가된다. 그러나 다수의 폐공이 존재하는 경우나 폐공을 통하여 상부의 대수층으로 염수 또는 이산화탄소가 급격하게 유출되는 경우가 발생할 수 있으므로 향후 연구에서는 이러한 조건하에서의 수치 모델링을 통한 정량적인 분석이 수행되어야 한다.

한편 폐공의 통한 이산화탄소의 누출은 (1) 케이싱과 시멘트 벽 사이, (2) 케이싱과 시멘트 마개 사이, (3) 시멘트 마개를 통하여, (4) 손상된 케이싱 틈,

(5) 손상된 시멘트 벽 틈, (6) 시멘트 벽과 지층 사이 등을 통해 이루어질 수 있다(Gasda *et al.*, 2004). 현실에서는 누출의 경로가 매우 복잡하게 분포하여 유체의 유동 양상을 단순화하기 어려우며, 특히 이러한 누출 경로의 연장과 연결 관계를 정량화하기가 어려운 측면이 있다. 기존의 여러 연구들과 본 연구에서는 이를 단순하게 등다공질매체로 고려하여 이러한 복잡한 누출 기작을 현실적으로 반영하지 못한 한계가 존재한다. 따라서 향후 실제 현장에 존재하거나 실험실에서 재현한 폐공에 대하여 유체 유동 양상과 이를 단순화하여 정량화(예, 등가 고유투수계수 산정 등)하는 연구가 절실히 필요하며, 이렇게 현실 자료로부터 산정된 값에 기반을 둔 수치 모델링 연구가 수행되어야 한다.

4. 결론

이산화탄소 지중 주입 시에 기존에 존재하는 폐공 또는 폐공 처리된 이산화탄소 주입정을 통하여 발생할 수 있는 염수 및 이산화탄소의 누출 양상을 정량적으로 예측 및 분석하기 위한 일련의 수치 모델링을 수행하였다. 이를 위하여 저장 대수층 및 폐공을 연계한 다상 유체 유동 수치 모델링을 수행하였고 폐공의 고유투수계수 변화에 따른 일련의 민감도 분석을 수행하였다.

기존의 폐공이 존재하는 경우 염수의 누출은 이산화탄소 주입에 의한 압력 증가에 따라서 급격하게 발생하며, 이산화탄소가 폐공 하부에 도달한 이후부터 염수의 누출률은 감소하는 반면 이산화탄소의 누출률은 크게 증가한다. 이산화탄소 주입이 종료된 이후에도 이산화탄소는 일정한 누출률을 가지며 지속적으로 누출된다. 또한 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 염수와 이산화탄소 모두의 누출률의 최대값이 증가하고 누출이 발생하는 시점이 더 빨라진다. 폐공 처리된 이산화탄소 주입정이 누출 경로로 작용하는 경우 염수의 누출은 상대적으로 짧은 기간 동안 나타나며, 이산화탄소는 곧바로 누출되기 시작하여 일정한 누출률을 가지며 지속적으로 누출된다. 이 경우에도 기존의 폐공이 존재하는 경우와 마찬가지로 폐공의 고유투수계수가 증가할수록 염수와 이산화탄소 모두의 누출률의 최대값이 증가하고 누출이 발생하는 시점이 더 빨라진다. 두 경우 모두 폐공

의 고유투수계수가 가장 높은 최악의 경우이더라도 폐공 하나만을 통한 염수 및 이산화탄소의 누출량은 기존의 대수층 내 염수의 총량 및 주입된 이산화탄소 총량에 비해서 매우 작게 나타나서 누출의 위험도 또는 위험도가 낮은 것으로 평가된다.

기존의 국내외 연구에서는 폐공을 통한 염수 및 이산화탄소의 누출을 간단한 단상 유체 유동 모델을 이용하여 평가하였는데 본 연구에서 제시된 누출의 양상과 확연하게 다른 결과를 보여준다. 특히 이러한 기존의 결과들은 염수 누출량에 대하여 과대평가를 이산화탄소의 누출량에 대하여 과소평가를 할 가능성이 높으며, 장기 예측에서 그 오차가 크게 나타나게 된다. 따라서 향후에는 다상 유체 유동을 고려하는 간단한 모델을 개발하고 이를 통합적으로 적용하는 연구들이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 폐공을 등다공질매체로 가정하여 이를 저장 지층과 연동한 수치 모델링 수행하였고 폐공을 통하여 다상 유동하는 염수와 이산화탄소의 누출률 및 누출량의 시간적 변화를 정량적으로 도출하였다. 이러한 수치 모델링 연동 기법과 연구 결과들은 이산화탄소 지층 저장 대상 지층 시스템의 밀봉 능력 분석과 이에 따른 이산화탄소 저장의 누출 위험도 및 위험도 평가 시에 합리적이고 실용적인 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 (재)한국이산화탄소포집및처리연구개발센터의 지원을 받아 수행되었습니다.(No. NRF-2015M1A8A1048896) 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 두 분의 심사자에게 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24, 755-769.
- Gasda, S.E., Bachu, S. and Celia, M.A., 2004, The potential for CO₂ leakage from storage sites in geological media: Analysis of well distribution in mature sedimentary basins. *Environmental Geology*, 46, 707-720.
- Holloway, S., 1997, An overview of the underground disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 38, 193-198.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2005, Mid- and long-term planning of research and development on geothermal resources utilization technologies. Final Report 2004-R-NC02-P-01-0-000, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 104 p (in Korean with English abstract).
- Kim, J.M., 2009, Development and field validation of characterization, drilling, injection, and prediction technologies for geologic sequestration of carbon dioxide. Annual Report 16-2008-08-001-00, Seoul National University, Seoul, Korea, 128 p (in Korean with English summary).
- Kim, J.M., 2012, Development of technologies for risk analysis of geologic storage of carbon dioxide and performance improvement of target geologic formation systems. Final Report 16-2011-01-002-00, Seoul National University, Seoul, Korea, 159 p (in Korean with English summary).
- Kim, J.M., Lee, S. and Kihm, J.H., 2012, CO₂-LEAK: A system-level probabilistic analysis model for deep groundwater (brine) and free/aqueous carbon dioxide leakage risk due to geologic storage of carbon dioxide, version 1.0. Technical Report, GGEL-2012-3, Geological and Groundwater Engineering Laboratory, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea, 47 p (in Korean with English summary).
- Metz, B., Davison, O., de Coninck, H., Loos, M. and Mayer, L.A. (eds.), 2005, Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 431 p.
- NETL (National Energy Technology Laboratory), 2013, Risk Analysis and Simulation for Geologic Storage of CO₂, 2013 revised edition. Report No. DOE/NETL-2013/1603, National Energy Technology Laboratory, USA, 68 p.
- Nordbotten, J.M., Celia, M.A., Bachu, S. and Dahle, H.K., 2005, Semianalytical solution for CO₂ leakage through an abandoned well. *Environmental Science and Technology*, 39, 602-611.
- Nordbotten, J.M., Celia, M.A. and Bachu, S., 2006, Similarity solutions for fluid injection into confined aquifers. *Journal of Fluid Mechanics*, 561, 307-327.
- Oldenburg, C.M. and Lewicki, J.L., 2006, On leakage and seepage of CO₂ from geologic storage sites into surface water. *Environmental Geology*, 50, 691-705.

- Oldenburg, C.M., Bryant, S.L. and Nicot, J.P., 2009, Certification framework based on effective trapping for geologic carbon sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 444-457.
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., 1999, TOUGH2 user's guide, version 2.0. Technical Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, 198 p.
- Spycher, N. and Pruess, K., 2005, CO₂-H₂O mixtures in the geological sequestration of CO₂, II. Partitioning in chloride brines at 12-100°C and up to 600 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 3309-3320.
- Stauffer, P.H., Viswanathan, H.S., Pawar, R.J., Klasky, M.L. and Guthrie, G.D., 2006, CO₂-PENS: A CO₂ sequestration system model supporting risk-based decisions. in *Proceedings of the 16th International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Copenhagen, Denmark, June 19-22.
- Stauffer, P.H., Pawar, R.J., Surdam, R.C., Jiao, Z., Deng, H., Lettelier, B.C., Viswanathan, H.S., Sanzo, D.L. and Keating, G.N., 2011, Application of the CO₂-PENS risk analysis tool to the Rock Springs Uplift, Wyoming. *Energy Procedia*, 4, 4084-4091.
- van Genuchten, M.Th., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Viswanathan, H.S., Pawar, R.J., Stauffer, P.H., Kaszuba, J.P., Carey, J.W., Olsen, S.C., Keating, G.N., Kavetski, D. and Guthrie, G.D., 2008, Development of a hybrid Process and system model for the assessment of well-bore leakage at a geologic CO₂ Sequestration site. *Environmental Science and Technology*, 42, 7280-7286.

Received : March 17, 2017

Revised : April 9, 2017

Accepted : April 10, 2017