

수치 모델링을 이용한 이산화탄소 지중 주입 운영 설계 변수 선정

김중휘

중원대학교 자원순환환경공학과

요 약

이산화탄소 지중 주입에 따른 주입정 주변 및 대상 지층에서의 지하수와 이산화탄소 유동 및 지열 이동을 정량적으로 예측 및 분석하기 위하여 일련의 열-수리학적 모델링을 수행하였다. 이러한 수치 모델링 결과를 바탕으로 다양한 환경, 조건 및 물성에 대한 주입 효율의 민감도 분석을 수행하여 이산화탄소 지중 주입 운영 설계에 크게 영향을 끼치는 주요한 변수들을 선정하였다. 대상 지층의 환경 및 주입 기법에 대한 수치 모델링 결과는 대상 지층의 심도 및 초기 지온과 주입 압력의 배수 모두 이산화탄소 주입 성능에 크게 영향을 끼침을 보여준다. 한편 대상 지층의 열적 물성에 대한 수치 모델링 결과들은 이산화탄소 주입 성능에 대한 대상 지층의 고체 밀도, 열용량 및 열전도도의 영향이 거의 없음을 보여준다. 마지막으로 대상 지층의 수리학적 물성에 대한 수치 모델링 결과들은 이산화탄소 주입 효율이 일차적으로는 고유(절대)투수계수에 큰 영향을 받으며, 다른 여러 요인들에 의해서 상대투수계수가 변화함에 따라서 이차적인 영향을 받음을 보여준다. 이에 따라서 이산화탄소 주입률과 주입도는 대상 지층의 고유투수계수와 van Genuchten의 불포화 수리 계수인 exponent항이 증가할수록 크게 증가하고 공극률과 잔류 가스 포화도가 증가할수록 소폭 감소하며, 잔류 지하수 포화도와 van Genuchten의 불포화 수리 계수인 gas-entry pressure항에 대해서는 민감하게 변화하지 않는다. 이러한 연구 결과들은 이산화탄소 지중 저장 대상 지층 시스템의 주입 능력 또는 효율 평가 그리고 주입 시설 설계 및 주입 기법 결정에 합리적이고 실용적인 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 이산화탄소 지중 저장, 이산화탄소 주입, 운영 설계 변수, 민감도 분석, 수치 모델링

Jung-Hwi Kihm, 2015, Evaluation of operation design variables for geologic injection of carbon dioxide using numerical modeling. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 2, p. 221-233

ABSTRACT: A series of thermo-hydrological numerical modeling is performed to predict and analyze quantitatively groundwater flow, carbon dioxide flow, and heat transport in an adjacent area of injection well and a target formation due to carbon dioxide injection. Based on these results of numerical simulations, a sensitivity analysis for the injection efficiency is performed under various environments, conditions, and properties, and the major variables, which impact significantly on the operation design for geologic injection of carbon dioxide, are evaluated. The results for environments of the target formation and injection scheme indicate that the depth and initial temperature of the target formation and ratio of injection pressure to initial pressure have significant effects on the injection efficiency of carbon dioxide. The results for thermal properties of the target formation show that the injection efficiency of carbon dioxide is not sensitive to the solid density, specific heat, and heat conductivity of the target formation. The results for hydrological properties of the target formation reveal that the injection efficiency of carbon dioxide primarily depend on the intrinsic (absolute) permeability, and it varies according to the relative permeability, which is influenced by other hydrological properties. The injection rate and injectivity of carbon dioxide increase significantly as the intrinsic permeability and van Genuchten's exponent of the target formation increase, whereas they decrease slightly as the porosity and the residual gas saturation of the target formation increase. However, they are most insensitive to variations in the residual water saturation and van Genuchten's gas-entry pressure of the target formation. These results of the numerical simulations and sensitivity analyses can be utilized as a reasonable and practical guideline for evaluating the injection efficiency or performance of carbon dioxide of the target formation, designing the injection facilities, and determining the injection scheme.

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

Key words: geologic carbon dioxide storage, carbon dioxide injection, operation design variables, sensitivity analysis, numerical modeling

(Jung-Hwi Kihm, Department of Resources Recycling and Environmental Engineering, Jungwon University, Goesan-gun 367-805, Republic of Korea)

1. 서 론

이산화탄소 지중 저장(geologic carbon dioxide storage)은 대표적인 온실가스인 이산화탄소를 대기로부터 안정적으로 격리할 수 있는 가장 효율적인 방법으로 평가되고 있다(Holloway, 1997; Metz *et al.*, 2005). 이산화탄소 지중 저장의 최적화를 위해서는 대상 지층 시스템의 성능 즉 주입, 저장 및 밀봉 능력의 분석과 예측이 선행되어야만 하며, 특히 지중 주입의 운영 설계 단계에서는 대상 지층의 주입 성능 또는 효율(injection performance or efficiency)을 정량적으로 파악하는 것이 매우 중요하다.

이산화탄소의 주입 효율은 이산화탄소 주입률(injection rate)과 주입도(injectivity)로 대변될 수 있다. 이산화탄소 주입률은 단위 시간당 주입된 이산화탄소의 질량을 의미한다. 한편 이산화탄소 주입도는 이산화탄소 주입률을 주입정과 이로부터 멀리 떨어져 있는 지층 간의 압력 차이로 나누어서 산정한다(Thomas, 1981). 여기에서 주입정으로부터 멀리 떨어져 있는 지층의 압력은 유체 주입에 의해 압력의 상승이 거의 발생하지 않는 지역의 압력을 의미하고 따라서 초기 지중 유체 압력으로 대변되기도 한다. 이러한 이산화탄소 주입률과 주입도는 주입 기법과 대상 지층의 주입 환경은 물론 대상 지층의 열적, 수리학적 및 지구화학적 특성 등에 의해 좌우된다.

이산화탄소 주입률은 주입정과 이로부터 멀리 떨어져 있는 지층 간의 압력 차이가 크면 클수록 증가하지만(Thomas, 1981) 이렇게 증가된 유체 압력이 지질역학적인 현상을 유발하여 주입정 또는 주입정 주변의 암석에 안정성을 훼손할 수 있다. 따라서 기존의 지중 유체 압력 대비 주입 압력의 비율은 이산화탄소 주입 중에 현장 조건에 따라서 제한되어야 한다. 주입 압력의 배수는 van der Meer (1996)에 의하면 1~5 km 심도의 지층에 대하여 약 2.4까지 가능하다. 또한 USEPA는 지중에 주입하는 유체에

대한 일반적인 기준으로 1.3~1.8배를 제시한 바 있으며, USEPA의 지중주입 제어 프로그램(underground injection control program)에 의하면 단일의 안정성을 유지하는 수준에서 1.1~2.1배를 제시한 바 있다(USEPA, 1994).

국외에서는 이러한 이산화탄소 주입 효율에 대한 다양한 연구들이 현재 진행 중에 있다. 먼저 기존에 석유공학의 분야에서 널리 사용되던 분석해를 기반으로 이산화탄소 주입 효율을 예측한 연구가 수행된 바 있다(Zakrisson and Edman, 2008). 또한 다상 수리학적 수치 모델링을 이용하여 비교적 간단한 모델링 영역에서 대상 지층의 수리학적 특성에 따른 이산화탄소 주입률 및 주입도를 산정한 연구(Burton *et al.*, 2009), 복잡한 분지 규모에서 이산화탄소 주입에 따른 압력 증가의 상한선을 고려한 이산화탄소 주입 성능 산정 연구(SCCS, 2011)가 수행되었다. 그 외에도 주입정 주변에서 염침전(salt precipitation)과 이에 따른 이산화탄소 주입 효율 변화를 예측한 수치 모델링 연구(Giorgis *et al.*, 2007)나 석탄층에서 미세 단일의 특성에 따른 이산화탄소 주입 효율을 예측하는 연구(Durucan and Shi, 2009) 등의 다양한 연구들이 현재 진행 중에 있다.

한편 국내에서는 이러한 이산화탄소 주입 효율에 관련된 연구가 일부 연구자들을 중심으로 제한적으로 이루어지고 있으며, 국내의 지질 환경과 이에 따른 이산화탄소 지중 저장의 조건을 반영한 연구가 매우 부족한 실정이다. 먼저 이산화탄소 주입에 의한 압력 변화를 기준으로 대상 지층의 주입 성능을 평가한 수치 모델링 연구가 수행된 바 있다(Kim *et al.*, 2009). 또한 주입정 주변에서 일어나는 염침전에 따른 주입 효율 저하를 예측한 수치 모델링 연구(Oh *et al.*, 2010)나 주입정의 배치에 따른 주입 효율의 변화를 모의한 연구(Oh *et al.*, 2011)가 수행된 바 있다. 하지만 이들 연구들에서는 이산화탄소의 주입을 모사하기 위하여 주입정에서 주변 지층으로 공급되는 이산화탄소의 시간당 질량을 고정하는 방식으로 연

구가 수행되어 주입 초기에 지중 유체 압력의 증가가 다소 과대평가되기도 하였다. 따라서 국내의 이산화탄소 지중 저장 대상 지층의 조건 및 특성을 반영하면서 이산화탄소 주입 시의 압력 및 온도 변화를 좀 더 현실적으로 반영한 수치 모델링 연구가 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 이산화탄소 지중 주입에 따른 주입정 주변 및 대상 지층에서의 지하수와 이산화탄소 유동 및 지열 이동을 다상 다성분의 열-수리학적 수치 모델링을 통하여 정량적으로 예측 및 분석하고 이러한 결과들을 바탕으로 다양한 환경, 조건 및 물성에 대한 주입 효율의 민감도 분석을 수행하여 이산화탄소 지중 주입 운영 설계에 크게 영향을 끼치는 주요한 변수들을 산정하는 것이다.

2. 열-수리학적 수치 모델링

2.1 열-수리학적 수치 모델링 설정

이산화탄소 지중 주입에 따른 주입정 주변 및 대상 지층에서의 지하수와 이산화탄소 유동 및 지열 이동을 정량적으로 예측 및 분석하기 위하여 열-수리학적 수치 모델링을 수행하였다. 본 연구에 사용된 다차원 다상 열-수리학적 수치 모델은 TOUGH2 (Pruess *et al.*, 1999)이며, 이산화탄소 지중 저장 환경에서의 이산화탄소 및 지하수 유체 특성을 합리적으로 고려할 수 있도록 ECO2N (Spycher and Pruess, 2005) 모듈을 사용하였다.

수치 모델링 대상 사암 대수층은 두께가 50 m이고 가로 및 세로가 5,000 m인 영역을 고려하였으며, 지표로부터 1,450~1,500 m 심도에 위치하고 있다 (그림 1). 사암 대수층은 상부와 하부가 덮개암으로 둘러싸여 있으며, 영역의 중심에 이산화탄소 주입정이 설치되어 있다. 사암 대수층은 총 7,220개의 삼차원 격자로 이산화되었으며, 격자의 길이는 주입정 주변의 15 cm에서 주입정으로부터 멀어지면서 500 m까지 점차적으로 증가한다. 여러 문헌들(van Genuchten, 1980; Carsel and Parrish, 1988; KIGAM, 2005; Kim, 2009)을 수집 및 분석하여 국내 육상 분지 내 사암 대수층의 열적 및 수리학적 특성에 대한 대표값과 범위를 산정하였으며, 이를 수치 모델링에 적용하였다. 대상 사암 대수층의 열적 및 수리학적 특성은 균질하고 등방성을 가지는 것으로 가정하였고

Table 1. Representative thermo-hydrological properties of the sandstone 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

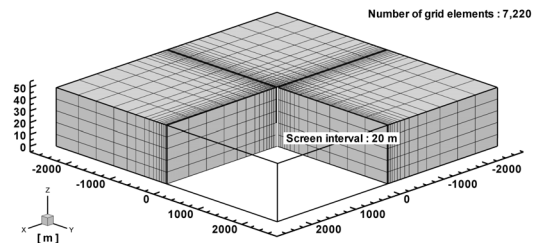


Fig. 1. Schematic diagram of the sandstone aquifer (modeling domain), CO₂ injection well, and grid elements used in the numerical simulations. The vertical coordinate axis z is exaggerated 20 times.

대표 경우(base case)의 수치 모델링에서는 분석된 열적 및 수리학적 물성의 대표값을 사용하였으며, 표 1에 정리되어 있다.

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 $0.0256^\circ\text{C}/\text{m}$ 와(KIGAM, 2005) 지표 온도 15.0°C 를 고려하여 53.4°C 를 부여하였다. 이산화탄소 주입은 주입정 하부의 20 m 구간에서 1년 동안 이루어지며, 주입정의 직경은 30 cm이다. 이산화탄소의 주입 방법은 지표 시설에서 64.5 atm, 23.0°C 의 이산화탄소를 단일 압축하여 주입(Metz *et al.*, 2005)하는 것으로 가정하였다. 또한 이때의 이산화탄소 엔탈피(enthalpy)값을 기준으로 하여 주입정 하부의 스크린구간에서 이산화탄소 주입 압력에 따른 주

입 온도를 Spycher and Pruess (2005)의 열역학 데이터베이스로부터 산정하였고 이를 Dirichlet 경계 조건으로 부여하였다. 즉 주입정 바닥에서 주입 압력 및 온도가 일정하게 유지되는 상태에서 대상 지층으로 이산화탄소가 주입되는 상황을 모사하였다. 대표 경우에 주입정의 스크린 구간에서 이산화탄소 주입 압력은 초기의 지층 유체 압력의 1.5배인 2.20×10^7 Pa로 하였고 이때 이산화탄소의 온도는 34.6°C 가 된다. 수치 모델링은 주입 기간 1년을 포함하여 총 10년 동안 수행되었다.

2.2 다양한 조건 및 열-수리학적 특성에 대한 민감도 분석 설정

이산화탄소 지층 주입 운영 설계 변수를 산정하기 위하여 ① 대상 지층의 환경 및 주입 기법, ② 대상 지층의 열적 특성, ③ 대상 지층의 수리학적 특성에 대한 민감도 분석이 수행되었다. 민감도 분석에

서는 앞에서 설명한 모델링 영역 설정, 이산화탄소 주입 방법 및 기간, 대상 지층의 환경과 초기조건 및 경계조건, 대상 지층의 열적 및 수리학적 물성의 대표값이 사용되었으며, 민감도 분석의 대상 변수만이 변화되었다.

먼저 대상 지층의 환경 및 주입 기법에 대하여 크게 다음의 세 가지 변수를 고려하였다. 지층 심도 (Case A)는 1,000~2,000 m의 범위에서 다섯 가지 경우를 고려하였고 이에 따라서 초기 지층 유체 압력 및 온도와 이산화탄소 주입 압력 및 온도가 변화한다. 초기 지층 유체 압력 및 온도는 각각 정수압 상태와 지온 경사 조건을 이용하여 산정하였고 주입 압력 및 온도는 등엔탈피(iso-enthalpic) 조건을 이용하여 산정하였다(표 2). 초기 지온(Case B)은 지온 경사 $0.0200\sim 0.4000^\circ\text{C}/\text{m}$ 와(KIGAM, 2005), 지표 온도 15.0°C 인 경우에 산정된 $45.0\sim 75.0^\circ\text{C}$ 의 범위에서 다섯 가지 경우를 고려하였다(표 2). 그리고 주입

Table 2. Initial and injection pressures and temperatures for different cases. Cases A-3, B-3, and C-2 have same configuration with the base case.

Case	Value	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Case A	Depth [m]	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000
	Initial pressure [Pa]	9.76×10^6	1.22×10^7	1.47×10^7	1.71×10^7	1.96×10^7
	Initial temperature [$^\circ\text{C}$]	40.6	47.0	53.4	59.8	66.2
	Injection pressure [Pa]	1.46×10^7	1.83×10^7	2.20×10^7	2.57×10^7	2.94×10^7
	Injection temperature [$^\circ\text{C}$]	31.2	33.1	34.6	35.6	36.5
Case B	Thermal gradient [Pa]	0.0200	0.0256	0.0300	0.0350	0.4000
	Initial temperature [$^\circ\text{C}$]	45.0	53.4	60.0	67.5	75.0
Case C	Pressure ratio	1.25	1.50	1.75	2.00	-
	Injection pressure [Pa]	1.83×10^7	2.20×10^7	2.57×10^7	2.93×10^7	-
	Injection temperature [$^\circ\text{C}$]	32.9	34.6	35.5	36.3	-

Table 3. CO₂ density, dynamic viscosity, and kinematic viscosity under various CO₂ injection pressures and temperatures for Cases A and C.

Case	Value	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Case A	CO ₂ density [kg/m^3]	835.7	861.9	883.8	903.7	920.9
	CO ₂ dynamic viscosity [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	7.86×10^{-5}	8.39×10^{-5}	8.88×10^{-5}	9.35×10^{-5}	9.78×10^{-5}
	CO ₂ kinematic viscosity [m^2/s]	9.40×10^{-8}	9.74×10^{-8}	1.00×10^{-7}	1.03×10^{-7}	1.06×10^{-7}
Case C	CO ₂ density [kg/m^3]	862.9	883.8	904.1	921.2	-
	CO ₂ dynamic viscosity [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	8.42×10^{-5}	8.88×10^{-5}	9.36×10^{-5}	9.79×10^{-5}	-
	CO ₂ kinematic viscosity [m^2/s]	9.75×10^{-8}	1.00×10^{-7}	1.04×10^{-7}	1.06×10^{-7}	-

압력의 배수(Case C)는 1.25~2.00배에 대하여 네 가지 경우를 고려하였고 이때 주입 압력 및 온도는 앞과 마찬가지로 등엔탈피 조건을 이용하여 선정하였다(표 2). 이러한 범위는 서론에서 언급된 연구 결과 및 기준의 주입 압력 범위를 고려하여 결정하였다. 또한 지층 심도(Case A) 및 주입 압력의 배수(Case C)에 대해서는 각 경우별로 이산화탄소의 주입 압력 및 온도가 변하는데 각각의 압력 및 온도 조건에서의 이산화탄소 유체 물성, 즉 밀도, 동적점성계수(dynamic viscosity) 및 이산화탄소의 유동성(mobility)에 영향을 주는 운동점성계수(kinematic viscosity)의 값을 표 3에 정리하였다.

대상 지층의 열적 특성에 대하여 크게 다음의 세 가지 변수를 고려하였다. 고체 밀도(Case D)는 2,638~2,974 kg/m³의 범위에서 세 가지 경우를 고려하였고 열용량(Case E)은 870~984 J/kg·°C의 범위에서 세 가지 경우를 고려하였으며, 열전도도(Case F)는 1.985~5.176 W/m·°C의 범위에서 세 가지 경우를 고려하였다(표 4). 세 가지 열적 변수는 KIGAM (2005)의 연구 내용을 기반으로 그 범위가 대표값을 선정하였다.

대상 지층의 수리학적 특성에 대하여 크게 다음의 여섯 가지 변수를 고려하였다. 공극률(Case G)은 3.0~7.0%의 범위에서 다섯 가지 경우를 고려하였고 고유투수계수(intrinsic permeability) (Case H)는

$1.020 \times 10^{-15} \sim 1.020 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 의 범위에서 다섯 가지 경우를 고려하였다(표 5). 공극률과 고유투수계수는 Kim (2009)의 연구에 의해 측정 및 수집된 결과들을 기반으로 그 범위를 선정하였다. 잔류 지하수 포화도(Case I)는 0.07~0.27의 범위에서 세 가지 경우를 고려하였고 잔류 가스 포화도(Case J)는 0.02~0.09의 범위에서 세 가지 경우를 고려하였다(표 5). 다상 유체의 거동을 좌우하는 불포화 수리 계수(unsaturated hydraulic parameter)는 van Genuchten (1980)의 모델을 고려하였고 이때 Gas-entry pressure(Case K)는 676~30,656 Pa의 범위에서 세 가지 경우를 Exponent (Case L)는 $8.257 \times 10^{-2} \sim 6.269 \times 10^{-1}$ 의 범위에서 다섯 가지 경우를 각각 고려하였다(표 5). 다상 유체의 거동을 모사할 때 사용되는 잔류 지하수 포화도, 잔류 가스 포화도 및 불포화 수리 계수들은 국내 이산화탄소 유망 지층에 대한 측정 자료가 거의 존재하지 않으며, Carsel and Parrish (1988)가 제시한 일반적인 결과를 범위 및 대표값 선정에 사용하였다.

대상 지층의 수리학적 특성 중 고유투수계수는 지질 매체(geologic media)가 유체를 통과시키는 능력을 정량화한 것으로 지질 매체의 구조에 의해 결정되며, 유체의 특성에는 독립적인 값이다. 단상(single phase)의 유체 유동에서는 고유투수계수가 곧 그 유체의 투수계수가 되는 반면 다상(multi

Table 4. Thermal properties of the sandstone aquifer for different cases. Cases D-2, E-2, and F-2 have same thermal properties with the base case.

Case	Property	Case 1	Case 2	Case 3
Case D	Solid density [kg/m ³]	2,638	2,675	2,794
Case E	Specific heat [J/kg·°C]	870.0	915.0	984.0
Case F	Heat conductivity [W/m·°C]	1.985	2.720	5.176

Table 5. Hydrological properties of the sandstone aquifer for different cases. Cases G-3, H-3, I-2, J-2, K-2, and L-3 have same hydrological properties with the base case.

Case	Property	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Case G	Porosity [%]	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
Case H	Intrinsic permeability [m ²]	1.020×10^{-15}	3.162×10^{-15}	1.020×10^{-14}	3.162×10^{-14}	1.020×10^{-13}
Case I	Residual water saturation	0.07	0.15	0.27	-	-
Case J	Residual gas saturation	0.02	0.05	0.09	-	-
Case K	Gas-entry pressure [Pa]	676	18,865	30,656	-	-
Case L	Exponent	8.257×10^{-2}	2.695×10^{-1}	4.565×10^{-1}	5.417×10^{-1}	6.269×10^{-1}

phase)의 유체 유동에서는 각 상(phase)의 유체의 투수계수가 자신의 포화도에 비례하는 값을 가지게 되며, 고유투수계수 대비 해당 상의 투수계수를 상대투수계수(relative permeability)로 나타낸다. 상대투수계수는 0에서 1사이의 값을 가지게 되며, 이와 대비되는 개념으로 고유투수계수를 절대투수계수(absolute permeability)로 정의하기도 한다. 따라서 본 연구와 같이 이산화탄소와 지하수가 혼재하는 경우 각 유체의 유동은 고유(절대)투수계수에 상대투수계수를 곱한 투수계수에 영향을 받게 되며, 지질 매체 자체의 특성인 고유투수계수와 앞서 언

급한 다양한 특성(유체의 포화도 및 불포화 수리 계수)에 의해 좌우되는 상대투수계수 모두가 이산화탄소의 주입 효율에 영향을 주게 된다.

3. 열-수리학적 수치 모델링 결과

3.1 대표 경우(base case)에 대한 수치 모델링 결과

대표 경우(base case)에 대한 열-수리학적 수치 모델링 결과 이산화탄소의 압력은 이산화탄소 주입 기간 1년 동안 주입정을 중심으로 증가하며, 주입이 종료되면 급격하게 감소한 후 초기의 정상 상태로

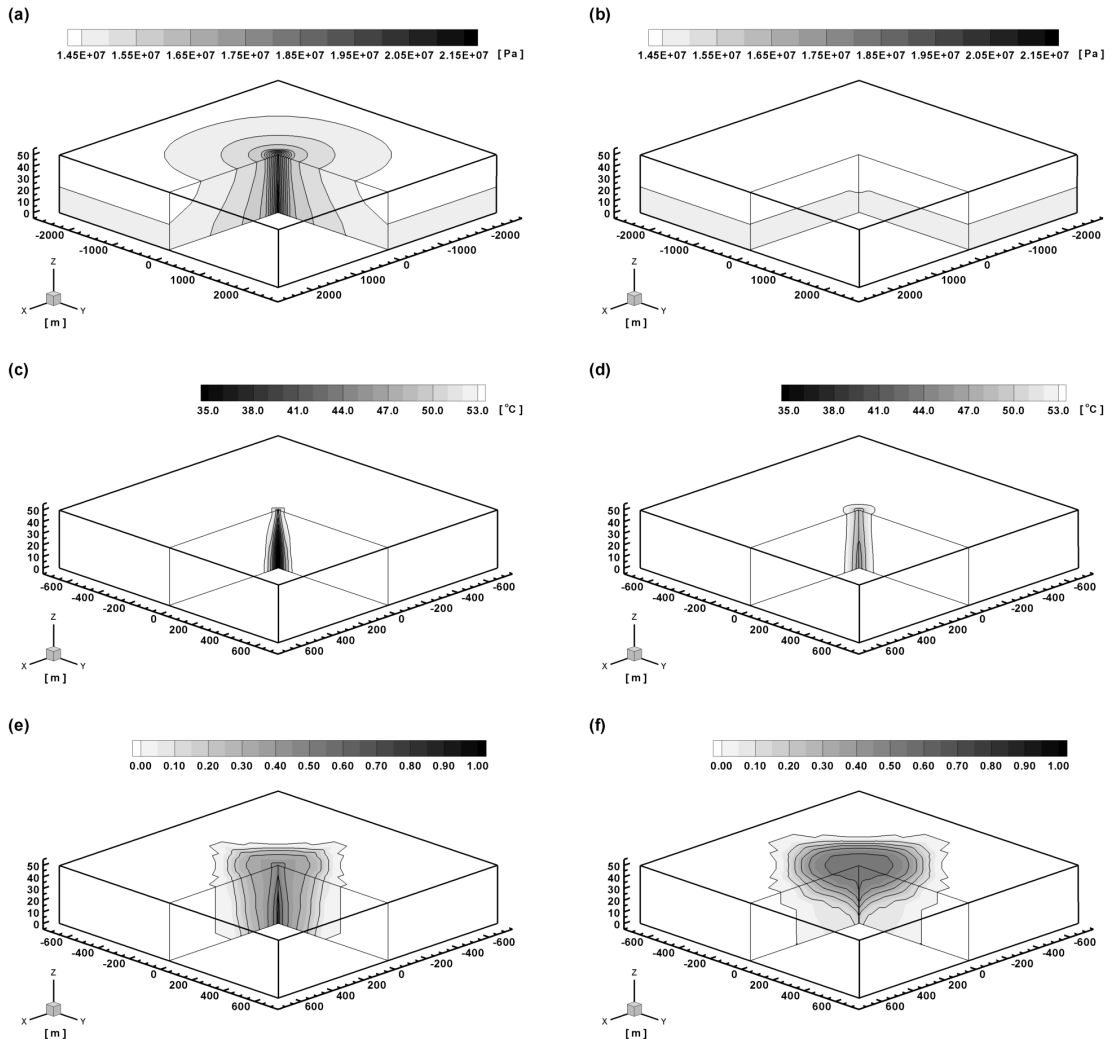


Fig. 2. Spatial distribution of (a) and (b) CO₂ pressure, (c) and (d) temperature, and (e) and (f) CO₂ saturation for base case after 1 year (left column) and 10 years (right column) since the start of CO₂ injection. The vertical coordinate axis is exaggerated 20 times for figs. (a) and (b) and 5.6 times for figs. (c) to (f).

점차적으로 회복된다(그림 2a, 2b). 또한 이산화탄소 주입에 의한 이산화탄소 압력 변화는 그 영향 범위가 모델링 영역 전체에 미친다. 주입되는 이산화탄소의 온도가 주변 지온에 비해서 매우 낮으므로(표 2) 주입정 주변에서 지온이 급격하게 떨어지지만 그 영향 범위가 이산화탄소의 압력과는 다르게 100 m를 넘지 않으며, 주입 종료 이후에는 점차적으로 원래의 온도를 회복한다(그림 2c, 2d). 자유상 이산화탄소는 주입 지점에서 부력에 의해 상부로 이동하고 상부에서 덮개암을 만나면 측면으로 이동하여 동심 원상으로 확장되는 양상을 보여준다(그림 2e, 2f).

본 연구에서는 이산화탄소 주입 압력 및 온도를 주입정 스크린 구간에서 Dirichlet 경계 조건으로 부여하여 주입정 바닥에서 주입 압력 및 온도가 일정하게 유지되는 상태에서 대상 지층으로 이산화탄소가 주입되는 상황을 모사하였다. 따라서 주입량 또는 주입률을 지정하여 수행된 다른 연구들과는 달리 주입정과 주변 지층 간의 경계에서 이산화탄소의 단위 시간당 유동량을 모니터링하고 이를 합산하는 방

식으로 이산화탄소 주입률을 산정하였다. 또한 이를 주입정과 이로부터 멀리 떨어져 있는 지층 간의 압력 차이로 나누어 이산화탄소 주입도를 산정하였다. 이산화탄소 주입률은 주입 초기의 약 10일만에 걸쳐서 매우 빠르게 증가하며, 주입정 주변이 이산화탄소로 충분히 포화된 이후에는 완만하게 증가하여 1년 후 3.42 kg/s (약 0.1 Mton/year)에 이른다(그림 3a). 주입정 주변에서 주입 초기에는 이산화탄소가 지하수를 밀어내면서 이산화탄소 포화도 및 상대투수계수가 증가하며, 이에 따라서 이산화탄소 주입률이 급격하게 증가한다. 주입정 주변이 충분히 이산화탄소로 포화되면 이러한 급격한 증가 양상은 중단되고 이후 이산화탄소 포화도가 넓은 지역에 걸쳐서 증가함에 따라서 주입률이 매우 완만하게 증가하게 된다. 한편 이산화탄소 주입도의 시간에 따른 변화는 주입률과 매우 유사한 경향을 보여주며(그림 3b), 이는 주입정과 이로부터 멀리 떨어져 있는 지층 간의 압력 차이가 주입 기간 동안 거의 변화하지 않기 때문이다.

한편 서론에서 언급한 바와 같이 기존의 연구들에서 이산화탄소의 시간당 질량을 고정하는 방식으로 이산화탄소를 주입하는 반면 본 연구에서는 이산화탄소 주입 압력 및 온도를 고정하는 방식으로 이산화탄소를 주입하였다. 이에 대한 차이를 정량적으로 보여주기 위하여 대표 경우에 대하여 주입된 이산화탄소 총량(1.01×10^8 kg)을 주입 기간 1년으로 나눈 주입률(3.195 kg/s)을 기존의 방식으로 주입하는 수치 모델링을 수행하였다. 수치 모델링 결과 중 주입정 바닥에서의 시간에 따른 이산화탄소 압력 변화를 초기의 지중 유체 압력 및 대표 경우의 주입 압

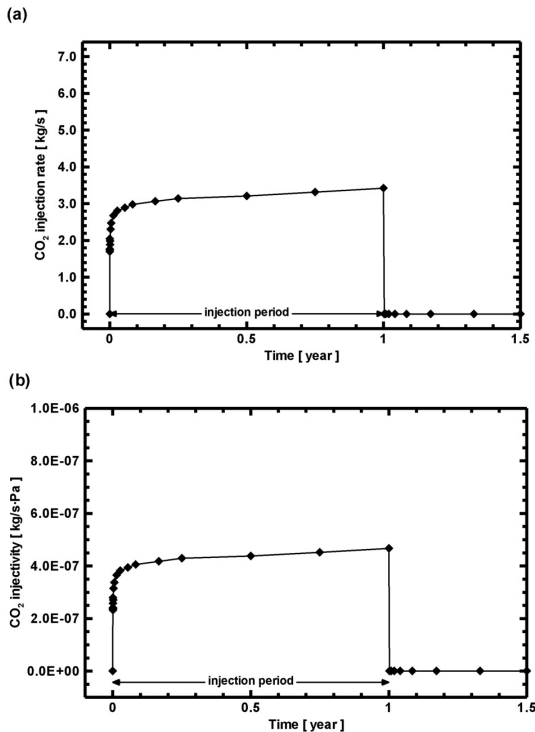


Fig. 3. Temporal changes in (a) CO₂ injection rate and (b) CO₂ injectivity for base case.

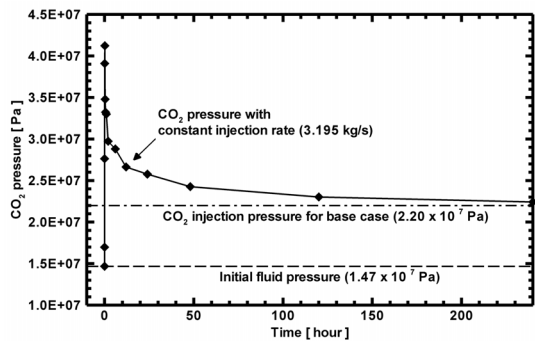


Fig. 4. Temporal changes in CO₂ pressure at the bottom of the injection well for constant injection rate case.

력과 비교하여 그림 4에 도시하였다. 기존의 방식으로 이산화탄소를 주입하는 경우 주입 초기(1시간 내외)에 이산화탄소 압력이 급격하게 증가하여 초기 지층 유체 압력 대비 약 2.8배에 이르며(대표 경우의 주입 압력은 1.5배), 이후 급격하게 감소하나 약 10 일 이상의 기간이 지나도 대표 경우의 주입 압력보다 높은 값을 유지한다. 이러한 결과는 서론에서 언급한 바와 같이 이산화탄소의 시간당 질량을 고정하는 방식을 사용하는 경우 주입 초기에 지층 유체 압력의 증가가 크게 과대평가될 수 있음을 보여준다.

3.2 대상 지층의 환경 및 주입 기법에 대한 수치 모델링 결과

먼저 대상 지층의 심도가 변화하는 경우(Case A) 지층 심도가 증가함에 따라서 주입률은 크게 증가하는 반면에 주입도는 상대적으로 완만하게 증가한다(그림 5a). 지층 심도에 따른 주입률의 이러한 변화 양상은 동일한 주입 압력 배수(초기 지층 유체 압력의 1.5배)를 적용하였을 때 지층 심도가 깊을수록 초

기 지층 유체 압력이 증가하므로 주입정과 지층간의 압력 차이가 상대적으로 증가하기 때문이다. 또한 주입도의 완만한 변화는 지층 심도의 증가에 따른 초기 지온의 증가(표 2 참조)에 기인한 것으로 판단 된다.

초기 지온의 영향은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째로 주어진 주입 압력 및 온도와 대상 지층의 초기 압력 및 지온 조건에서는(표 2 참조) 주입된 이산화탄소의 온도가 증가할수록 유체의 유동성을 좌우하는 운동점성계수의 역수가 증가하기 때문에(Spycher and Pruess, 2005) 이산화탄소 주입도가 증가한다. 두 번째로 초기 지온이 높을수록 자유상 이산화탄소의 밀도가 낮아서 동일한 양이 주입되었을 경우 주입정 주변의 이산화탄소 포화도가 더 빠르게 증가하며, 영향 반경 역시 같이 증가한다. 이에 따라서 주입정 주변에서 전체적인 이산화탄소 상대투수계수의 증가가 나타나고 최종적으로는 초기 지온이 증가할수록 이산화탄소 주입도가 증가한다.

대상 지층의 초기 지온이 변화하는 경우(Case B)

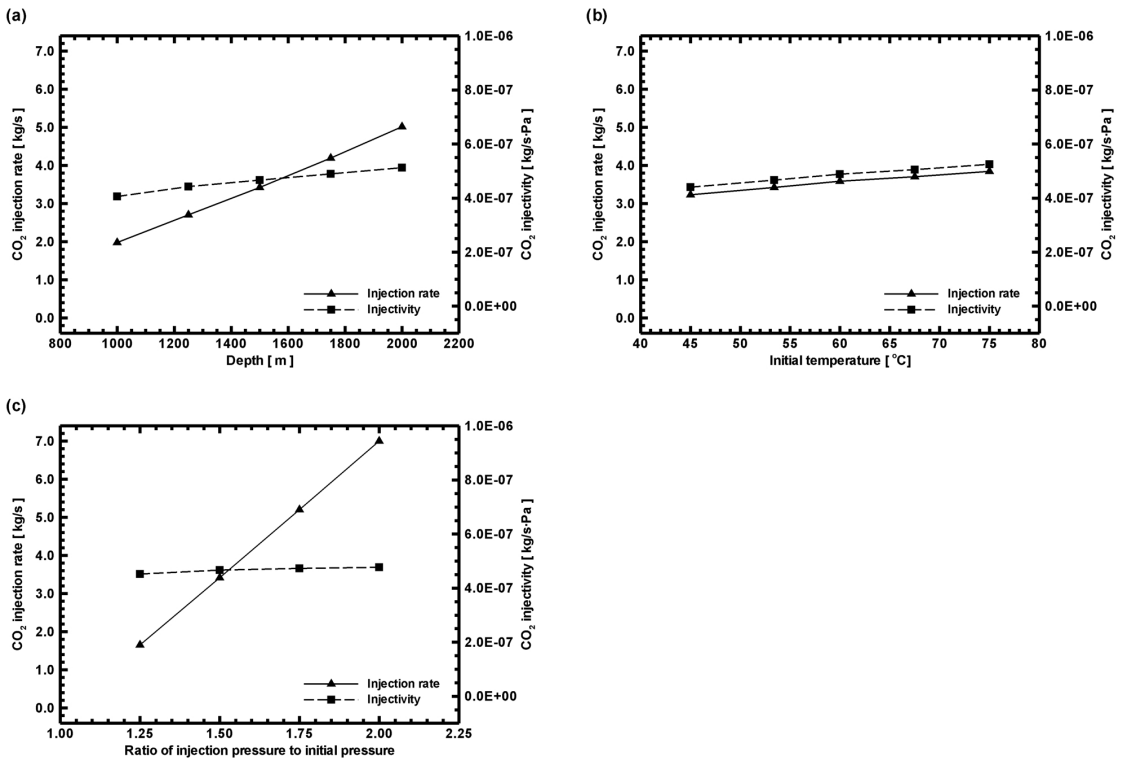


Fig. 5. CO₂ injection rate and injectivity after 1 year since the start of CO₂ injection with respect to (a) depth of sandstone aquifer (Case A), (b) initial temperature (Case B), and (c) injection pressure ratio (Case C).

초기 지온이 증가함에 따라서 주입률과 주입도 모두 완만하게 증가한다(그림 5b). 이러한 변화 양상은 앞에서 설명한 초기 지온의 영향으로 해석될 수 있다.

주입 압력의 배수가 변화하는 경우(Case C) 주입 심도 및 지온과 마찬가지로 주입 압력의 배수가 증가함에 따라서 주입률은 크게 증가하는 반면에 주입도는 상대적으로 소폭 증가한다(그림 5c). 이것은 주입률이 주입 압력에 민감하게 영향을 받는 반면에 주입도는 대상 지층의 열-수리학적 특성과 지층 환경을 대변하는 지표임을 의미한다.

3.3 대상 지층의 열적 물성에 대한 수치 모델링 결과

먼저 대상 지층의 고체 밀도가 변화하는 경우(Case D) 이산화탄소 주입률 및 주입도에 대한 고체 밀도 변화의 영향이 거의 나타나지 않는다(그림 6a). 또한 대상 지층의 열용량이 변화하는 경우(Case E) 이산화탄소 주입률 및 주입도에 대한 열용량 변화의 영향이 거의 나타나지 않으며(그림 6b), 이는 대상 지층의 열전도도가 변화하는 경우(Case F)에도 마

찬가지로 이산화탄소 주입률 및 주입도에 대한 열전도도의 영향이 거의 나타나지 않는다(그림 6c).

앞 절에서 분석한 바와 같이 대상 지층의 초기 지온 분포는 이산화탄소의 물성(밀도 및 동적점성계수)과 상대투수계수에 변화를 유발하여 이산화탄소 주입률 및 주입도에 큰 영향을 끼친다. 하지만 앞의 결과들에서 나타난 바와 같이 이산화탄소 주입률 및 주입도에 대한 대상 지층의 열적 물성의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 이산화탄소 주입에 의한 지온 변화가 근본적으로 주입정 주변의 매우 좁은 영역에서만 일어나며, 대부분의 영역에서는 초기 지온이 더 큰 영향력을 가지기 때문인 것으로 해석된다.

3.4 대상 지층의 수리학적 물성에 대한 수치 모델링 결과

먼저 대상 지층의 공극률이 변화하는 경우(Case G) 공극률이 증가함에 따라서 주입률과 주입도 모두 감소한다(그림 7a). 이것은 공극률이 작으면 작을

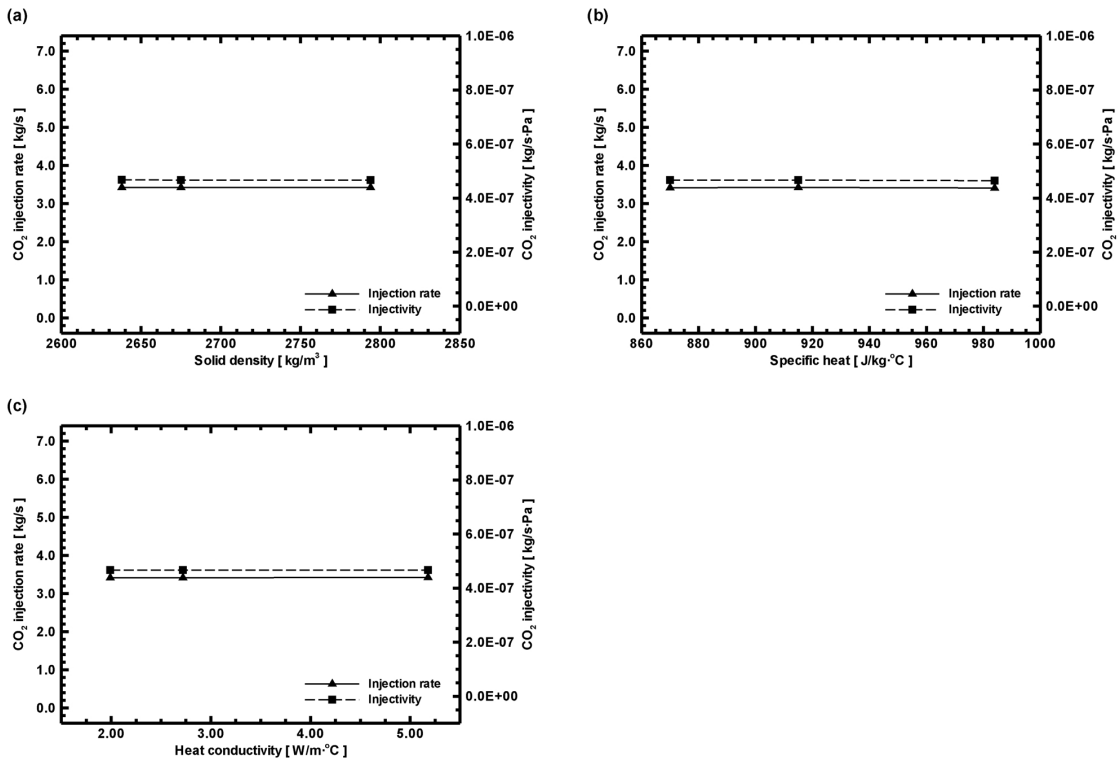


Fig. 6. CO₂ injection rate and injectivity after 1 year since the start of CO₂ injection with respect to (a) solid density (Case D), (b) specific heat (Case E), and (c) heat conductivity (Case F).

수록 주입정 주변의 이산화탄소 포화도를 더 빠르게 증가시켜서 이산화탄소 상대투수계수를 증가시킬 수 있기 때문이다.

대상 지층의 고유투수계수가 변화하는 경우(Case H) 고유투수계수가 증가함에 따라서 주입률과 주입도 모두 급격하게 증가한다(그림 7b). 이산화탄소 주입을 및 주입도의 변화의 크기는 고유투수계수의 값에 거의 선형적으로 비례하여 나타나는데 이것은 이

산화탄소 주입 효율에 대상 지층의 수리학적 특성 중에서 고유(절대)투수계수가 일차적으로 가장 큰 영향을 끼침을 지시한다.

대상 지층의 잔류 지하수 포화도가 변화하는 경우(Case I) 잔류 지하수 포화도가 증가함에 따라서 이산화탄소 주입률과 주입도가 소폭 증가한다(그림 7c). 또한 대상 지층의 잔류 가스 포화도가 변화하는 경우(Case J) 잔류 가스 포화도가 증가함에 따라서

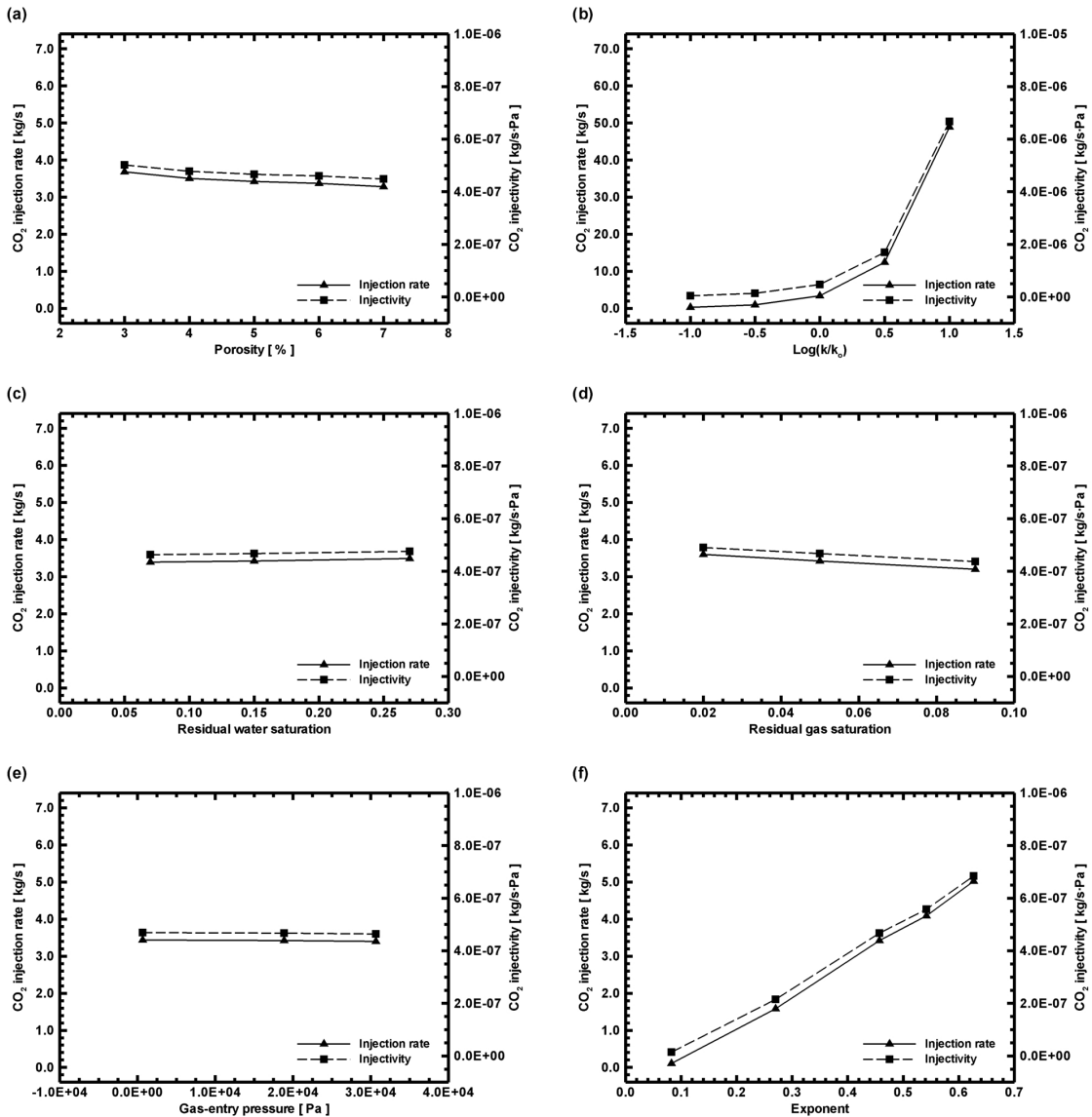


Fig. 7. CO₂ injection rate and injectivity after 1 year since the start of CO₂ injection with respect to (a) porosity (Case G), intrinsic permeability (Case H), residual water saturation (Case I), residual gas saturation (Case J), gas-entry pressure (Case K), and exponent (Case L).

이산화탄소 주입률과 주입도가 감소한다(그림 7d). 이러한 양상은 잔류 가스 포화도가 감소하면 지하수가 이산화탄소로 치환되는 구간에서 이산화탄소 상대투수계수의 증가가 더 빨리 일어나기 때문이다. 또한 이것은 이산화탄소 상대투수계수의 변화가 잔류 지하수 포화도보다는 잔류 가스 포화도의 변화에 더 민감함을 지시한다.

van Genuchten (1980)의 불포화 수리 계수 중 gas-entry pressure항이 변화하는 경우(Case K) 이산화탄소 주입률 및 주입도에 대한 gas-entry pressure항의 영향이 거의 나타나지 않는다(그림 7e). 이는 gas-entry pressure항이 이산화탄소가 지하수를 밀어낼 때 극복해야 하는 모세관 장벽(capillary barrier)을 좌우하는 중요한 요소이긴 하나 주어진 값의 범위에서는 이산화탄소 포화도나 상대투수계수에 큰 영향을 주지 못하기 때문이다.

van Genuchten (1980)의 불포화 수리 계수 중 exponent항이 변화하는 경우(Case L) exponent항이 증가함에 따라서 이산화탄소 주입률과 주입도 모두 거의 선형적으로 증가한다(그림 7f). 이러한 양상은 exponent항이 증가하면 지하수가 이산화탄소로 치환되는 구간에서 이산화탄소 상대투수계수의 증가가 더 빨리 일어나기 때문이다. 또한 이것은 이산화탄소 상대투수계수의 변화가 van Genuchten의 불포화 수리 계수 중 gas-entry pressure항보다는 exponent항에 훨씬 더 민감함을 지시한다.

대상 지층의 수리학적 특성 중에서 이산화탄소 주입 효율에 가장 큰 영향을 끼치는 요인은 주입정 주변에서의 이산화탄소 고유(절대)투수계수 및 상대투수계수인 것으로 평가된다. 특히 이산화탄소 고유투수계수는 이산화탄소 주입률과 주입도에 거의 선형적으로 크게 영향을 끼친다. 반면에 그 외에 다른 수리학적 특성들은 이산화탄소 상대투수계수를 변화시킴으로써 상대적으로 작은 범위 내에서 이산화탄소 주입률과 주입도에 영향을 끼친다.

4. 결론

이산화탄소 지중 주입에 따른 주입정 주변 및 대상 지층에서의 지하수와 이산화탄소 유동 및 지열 이동을 정량적으로 예측 및 분석하고 이를 바탕으로 이산화탄소 지중 주입 운영 설계 변수를 산정하기

위하여 일련의 다상 다성분 열-수리학적 모델링을 수행하였다. 이를 위하여 대상 지층의 환경 및 주입 기법, 대상 지층의 열적 특성, 대상 지층의 수리학적 특성에 대한 다양한 경우의 이산화탄소 주입 모델링을 수행하고 대상 변수들에 대한 이산화탄소 주입 성능인 주입률과 주입도의 민감도를 분석하여 주요한 이산화탄소 지중 주입 운영 설계 변수를 도출하였다.

일정한 이산화탄소 주입 압력 및 온도가 주어지는 경우 이산화탄소 주입에 의한 이산화탄소 압력 변화는 그 영향 범위가 모델링 영역 전체에 미치는 반면 지온 변화는 매우 좁은 영역에서만 나타난다. 그리고 이산화탄소 주입률과 주입도는 초기에 매우 빠르게 증가하며, 주입정 주변이 이산화탄소로 충분히 포화된 이후에는 완만하게 증가한다.

먼저 대상 지층의 환경 및 주입 기법에 대한 수치 모델링 결과는 대상 지층의 심도 및 초기 지온과 주입 압력의 배수 모두 이산화탄소 주입 성능에 크게 영향을 주는 요소임을 보여준다. 이산화탄소 주입률은 주입 압력의 배수 또는 입정과 지층간의 압력 차이에 민감하다. 반면 이산화탄소 주입도는 대상 지층의 열-수리학적 특성과 지층 환경을 대변하는 지표이며, 열-수리학적 특성이 일정한 경우 초기 지온이 이산화탄소의 물성(밀도 및 동적점성계수)과 상대투수계수에 변화를 유발하여 주입도에 큰 영향을 끼친다. 그리고 대상 지층의 열적 물성에 대한 수치 모델링 결과들은 이산화탄소 주입 성능에 대한 대상 지층의 고체 밀도, 열용량 및 열전도도의 영향이 거의 없음을 보여준다. 이것은 이산화탄소 주입에 의한 열적 변화가 주입정 주변의 매우 좁은 영역에 걸쳐서 일어나며, 대부분의 영역에서는 초기 지온이 더 큰 영향력을 가지기 때문이다. 마지막으로 대상 지층의 수리학적 물성에 대한 수치 모델링 결과들은 이산화탄소 주입 효율이 일차적으로는 고유(절대)투수계수에 큰 영향을 받으며, 다른 여러 요인들에 의해서 상대투수계수가 변화함에 따라서 이차적인 영향을 받음을 보여준다. 이에 따라서 이산화탄소 주입률과 주입도는 대상 지층의 고유투수계수와 van Genuchten (1980)의 불포화 수리 계수인 exponent항이 증가할수록 크게 증가하고 공극률과 잔류 가스 포화도가 증가할수록 소폭 감소하며, 잔류 지하수 포화도와 van Genuchten (1980)의 불포화

수리 계수인 gas-entry pressure항에 대해서는 민감하게 변화하지 않는다.

본 연구에서는 기존의 연구들과는 다르게 일정한 이산화탄소 주입 압력 및 온도가 주어지는 경우에 대하여 이산화탄소 주입 효율을 분석하였다. 이러한 방법을 사용하는 경우 이산화탄소 주입 효율에 영향을 줄 수 있는 요소 중 하나인 주입정 설정, 즉 주입정 직경이나 스크린 구간 길이 등의 영향을 정량적으로 평가할 수 있다. 그러나 주입정 설정의 경우 주입정 내부에서의 다상 유체 유동(이산화탄소 및 지하수) 및 열 이동(주입정 내부, 주입정과 주변 지층 사이)의 매우 복잡한 현상을 모사하여야 하기 때문에 본 연구에서는 고려되지 못하였다. 따라서 향후 이러한 주입정 내에서의 열-수리학적 현상에 대한 수치 모델링 연구가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 대상 지층의 환경 및 주입 기법과 열-수리학적 물성에 대한 이산화탄소 주입 효율 변화의 경향을 분석하고 이를 바탕으로 이산화탄소 지중 주입 운영 설계에 크게 영향을 끼치는 민감한 변수들을 도출하였다. 이러한 연구 결과들은 이산화탄소 지중 저장 대상 지층 시스템의 주입 능력 또는 효율 평가 그리고 주입 시설 설계 및 주입 기법 결정에 합리적이고 실용적인 지침으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 (재)한국이산화탄소포집및처리연구개발센터의 지원을 받아 수행되었습니다(No. NRF-2014M1A8A1049344). 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 김영석 교수님과 익명의 심사자께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Burton, M., Kumar, N. and Bryant, S.L., 2009, CO₂ injectivity into brine aquifer: why relative permeability matters as much as absolute permeability. *Energy Procedia*, 1, 3091-3098.
- Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988, Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24, 755-769.
- Durucan, S. and Shi, J.Q., 2009, Improving the CO₂ well injectivity and enhanced coalbed methane production performance in coal seams. *International Journal of Coal Geology*, 77, 214-221.
- Giorgis, T., Carpita, M. and Battistelli, A., 2007, 2D modeling of salt precipitation during the injection of dry CO₂ in a depleted gas reservoir. *Energy Conversion and Management*, 48, 1816-1826.
- 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, 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, 435-448 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Oh, J.H., Kim, K.Y., Kim, T. and Kim, J.C., 2010, Simulation of salt precipitation characteristics due to carbon dioxide injection into geologic formation. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Gyeongju, October 27-30, 311 p (in Korean).
- Oh, J.H., Kim, K.Y., Kim, T. and Kim, J.C., 2011, Impacts of injection well arrangement on geologic storage of carbon dioxide. Annual Conference of the Korean Society of Economic and Environmental Geology (Abstracts), Mokpo, April 27-29, 248 p (in Korean).
- 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.
- SCCS (Scottish Carbon Capture and Storage), 2011, Progressing Scotland's CO₂ storage opportunities.

- Technical Report, Scottish Carbon Capture and Storage (SCCS), Edinburgh, UK, 60 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.
- Thomas, G.W. (ed.), 1981, Principles of Hydrocarbon Reservoir Simulation. International Human Resources Development Corporation, Boston, Massachusetts, 196 p.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1994, Determination of Maximum Injection Pressure for Class I Wells. Region 5 -- Underground Injection Control Section Regional Guidance #7.
- van der Meer, L.G.H., 1996, Computer modeling of underground CO₂ storage. *Energy Conversion and Management*, 37, 1155-1160.
- 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.
- Zakrisson, J. and Edman, I., 2008, Multiwell injectivity for CO₂ storage. 2008 SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, Perth, Australia, October 20-22.
-
- Received : February 24, 2015
Revised : March 22, 2015
Accepted : March 25, 2015