



이산화탄소 지중저장과 원유 회수증진 공정을 위한 저류층 모델링

†김승혁 · 이종민 · 윤인섭

서울대학교 화학생물공학부 화학공정신기술연구소
(2012년 5월 10일 투고, 2012년 6월 26일 수정, 2012년 6월 26일 채택)

Reservoir Modeling for Carbon Dioxide Sequestration and Enhanced Oil Recovery

†Seunghyok Kim · Jong Min Lee · En Sup Yoon

School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received May 10, 2012; Revised June 26, 2012; Accepted June 26, 2012)

요약

전 세계적으로 주목받는 탄소 포집 및 저장 기술(CCS)은 현재 많은 연구가 이루어져서 대규모 탄소 포집이 가능한 시점에 있다. 이에 대규모 이산화탄소 포집에 적합한 저장 기술 또한 주목을 받고 있는데, 그 중 하나가 이산화탄소 원유 회수증진 공정(CO₂-EOR)이다. 이는 이산화탄소의 지중저장은 물론 원유 회수를 증가시키므로, 환경적인 측면과 경제적인 측면을 모두 만족시킬 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 다공성 매질인 저류층을 통과하는 원유와 이산화탄소 혼합유체의 흐름을 모델링하고, 모델링을 통해 이산화탄소 저장 및 원유 회수증진의 효과를 보이고자 하였다. 혼합유체를 모델링하기 위해 Darcy-Muskat의 법칙으로부터 확산성, 점도 변화를 추가 고려하여 저류층 내 압력과 포화도를 계산하였고, 수치 해석적 모델링을 위해서 유한체적법(finite volume method)을 이용하였다. 그 결과, 저류층 내 원유와 물, 이산화탄소를 주입했을 경우 각 주입물질별 시간에 따른 압력과 포화도의 변화를 예측할 수 있었고, 이산화탄소 주입 방법이 물을 주입하는 방법보다 원유 회수 측면에서 더 유리한 것을 확인할 수 있었다.

Abstract - Manifold researches for carbon capture and storage (CCS) have been developed and large scale-carbon capture system can be performed recently. Hence, the technologies for CO₂ sequestration or storage become necessary to handle the captured CO₂. Among them, enhanced oil recovery using CO₂ can be a solution since it guarantees both oil recovery and CO₂ sequestration. In this study, the miscible flow of oil and CO₂ in porous media is modeled to analyze the effect of enhanced oil recovery and CO₂ sequestration. Based on Darcy-Muskat law, the equation is modified to consider miscibility of oil and CO₂ and the change of viscosity. Finite volume method is used for numerical modeling. As results, the pressure and oil saturation changes with time can be predicted when oil, water, and CO₂ are injected, respectively, and CO₂ injection is more efficient than water injection for oil recovery.

Key words : enhanced oil recovery, reservoir modeling, carbon dioxide, finite volume method (FVM)

†주저자:hyok20@pslab.snu.ac.kr

I. 서론

탄소 포집기술이 발전하고, 대규모 탄소 포집이 가능해짐에 따라 포집된 이산화탄소를 저장·처리하는 방법의 필요성이 커지고 있다. 지금까지 이산화탄소 저장 및 처리를 위해 가장 많이 쓰이는 방법은 지중저장이었다. 그러나 여전히 주입시스템이나 파이프라인 건설 등 많은 비용의 사용이 불가피하였다. 이러한 비용의 보상을 위해 제안할 수 있는 것이 이산화탄소를 이용한 원유 회수증진 기법이다. 이는 자연적인 압력차에 의한 1차 원유 회수가 종료된 저류층에 이산화탄소를 주입하여 원유 회수를 증진하는 방법이다. 주입된 이산화탄소는 저류층에 남아있는 원유를 밀어내고, 또한 원유와 혼합하여 원유의 점도를 감소시켜 원유의 유동성을 증가시킴으로써 원유 회수를 증가시킨다[1]. 이와 같이 원유 회수를 증진하여 얻는 이익과 동시에 포집된 이산화탄소를 처리함으로써 탄소 포집 및 저장으로부터 나오는 비용을 보상받을 수 있게 될 것이다. 그러므로 본 연구에서는 다공성 매질인 저류층을 통과하는 원유와 이산화탄소 혼합유체의 흐름을 모델링하고, 모델링을 통해 이산화탄소 저장 및 원유 회수증진의 효과를 보이고자 하였다.

다공성 매질에서 유체를 표현하는 가장 기본적인 식으로는 유체의 질량에 관한 연속식(continuity equation), 식 (1) 과 Darcy-Muskat 법칙, 식 (2)를 들 수 있다[2].

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot v &= \frac{q}{\rho} \\ v &= -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla z) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ϕ 는 공극률, ρ 는 밀도, t 는 시간, v 는 유체 속도, q 는 플럭스(flux), k 는 투과율, μ 는 점도, p 는 압력, g 는 중력상수, z 는 공간좌표를 의미한다. 식 (1)을 혼합유체의 경우로 설정하고, 식 (2)를 식 (1)에 대입한 후 식 (2)에서 중력부분을 생략하면 다음과 같이 변형할 수 있다[3].

$$\begin{aligned} \phi \frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot (vs - D\nabla s) &= \bar{s}q \\ v &= -\frac{k}{\mu} \nabla p \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 q 는 경계에서 외부유량을 의미하고, 경계 조건은 0으로 가정한다[3]. s 는 저류층 내 한 지점에서 포화도, \bar{s} 는 경계에서 포화도를 의미하고, D 는 물질의 확산도를 의미한다.

이와 같이 다공성 매질에서 혼합유체의 이동현상을 모델링하는 것은 압력과 포화도에 대한 두 편미분방정식을 푸는 것이다. 압력에 관한 식은 타원형(elliptic), 포화도에 관한 식은 포물선형(parabolic) 편미분방정식이다. 특히, 위 식과 같이 강하게 결합된(coupled) 편미분방정식을 해석적인 방법으로 풀기에는 무리가 있으므로, 수치해석적으로 풀어야 하는데, 이를 위해 정확한 근사법이 필요하다.

일반적으로 편미분방정식을 수치해석적으로 해결하기 위해 유한차분법(finite difference method)이 주로 사용되어 왔다. 그러나 저류층 모델링은 계의 크기가 크고, 좀 더 많은 물리학적 물성이 관여가 되기 때문에 셀 볼륨의 평균값을 이용하는 유한체적법(finite volume method)을 주로 사용한다. 본 연구에서는 유한체적법 중 가장 널리 쓰이는 근사방법 중 하나인 2점 유동 근사법(two-point flux approximation, TPFA)을 이용하여 저류층의 압력과 포화도를 나타내고자 하였다. 또한 이를 이용하여 원유와 물을 이용한 원유 회수증진과 이산화탄소를 이용한 원유 회수증진 공정의 차이점을 알아보려고 하였다.

II. 이론 및 모사방법

2.1. 원유-이산화탄소 혼합유체의 압력변화

저류층 내 원유와 이산화탄소의 혼합유체 압력변화를 고려하기 위해 먼저 식 (1)을 이용하였다. 원유와 이산화탄소는 저류층 내에 액체와 기체 2가지 상으로 존재한다. 그러므로 식 (1)의 첫 번째 항을 2가지 물질과 2가지 상태에 대한 식으로 정리하면 식 (4)와 같다. 이때, 액상과 기상에 있는 물질의 질량분율의 합은 $1(c_{bl} + c_{bg} = 1)$ 이므로, 각 상에 대한 식의 열거는 생략하였다. 그리고 b 는 구성물질(원유와 이산화탄소)을 의미하고, l 과 g 는 각각 액상과 기상을 의미한다.

$$\frac{\partial \phi \rho_b s_b}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_b v_b) = q_b \quad (4)$$

식 (4)를 각 구성물질의 밀도로 나누고, 연쇄법칙(chain rule)을 사용하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} s_b + \phi \frac{\partial s_b}{\partial t} + \phi \frac{s_b}{\rho_b} \frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \nabla \cdot v_b + \frac{v_b \cdot \nabla \rho_b}{\rho_b} = \frac{q_b}{\rho_b} \quad (5)$$

식 (5)를 바탕으로, 원유와 이산화탄소에 대해 열거한 후 두 식을 더하면 식 (6)과 같이 물질의 압력에 대한 편미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & -\nabla \cdot (\lambda_c \nabla p_c + \lambda_o \nabla p_o) + c_r \phi \frac{\partial p}{\partial t} \\
 & -c_c (\nabla p_c \lambda_c \nabla p_c - \phi s_c \frac{\partial p_c}{\partial t}) \\
 & -c_o (\nabla p_o \lambda_o \nabla p_o - \phi s_o \frac{\partial p_o}{\partial t}) = q
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\lambda = \frac{k}{\mu}$ 이고, c_r 은 저류층을 구성하는 암석의 압축률(compressibility, $c_r = \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dp}$)를, c_o 와 c_c 는 각각 원유와 이산화탄소의 압축률($c = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}$)을 나타낸다. 본 연구에서 모든 물질은 비압축성 물질로 가정하였다($c_r, c_o, c_c = 0$) [4]. 그러나 식 (6)에는 여전히 두 개의 미지변수(p_c, p_o)가 있고, 포화도 s_c, s_o 와 결합되어 있어서 계산하기가 쉽지 않다. 이 문제를 해결하기 위해 원유와 이산화탄소의 압력차($p_d = p_o - p_c$)를 고려한 보상압력(p_{com})을 이용하면, 실제 압력을 $p_r = p_o - p_{com}$ 로 표현할 수 있다. 그리고 p_{com} 는 식 (7)로 정의된다.

$$p_{com}(s_i) = \int_1^{s_i} f_i(\xi) \frac{\partial p_d}{\partial s_i}(\xi) d\xi \tag{7}$$

여기서 f_i 는 각 물질의 유동분율을 나타낸다 ($f_i = \lambda_i / \sum \lambda_i$). 또한 식 (7)은 $\nabla p_{com} = f_i \nabla p_d$ 로 바꿀 수 있으며, 식 (2)에 대입한 후 두 식을 더하면 식 (8)과 같이 실제 압력에 대한 타원형 편미분방정식을 얻을 수 있다.

$$-\nabla \cdot \lambda \nabla p_r = q \tag{8}$$

여기서 $\lambda = \lambda_c + \lambda_o$ 이며, 본 연구에서는 중력과 경계조건에서 흐름을 0으로 가정하였다.

2.2. 원유-이산화탄소 혼합유체의 포화도 변화

혼합유체의 포화도 변화에 대한 식을 구하기 위해 먼저 원유와 이산화탄소 포화도의 합은 1과 같고 ($s_c + s_o = 1$), 전체 유체의 속도는 각 유체 흐름의 속도와 같다($v_c + v_o = v$)라고 가정하였다. 식 (2)로부터 각각의 v 를 구한 후 두 식을 빼면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_o v_c - \lambda_c v_o = \lambda_o \lambda_c \nabla p_d \tag{9}$$

$v_o = v - v_c$ 이기 때문에 식 (9)를 v_c 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$v_c = f_c (v + \lambda_o \nabla p_d) \tag{10}$$

그리고 $\nabla p_d = \frac{\partial p_d}{\partial s_c} \nabla s_c$ 임을 이용하여 정리하면 식 (3)은 다음과 같이 변형된다.

$$\phi \frac{\partial s_c}{\partial t} + \nabla \cdot (f_c(s_c)(v + d(s_c, \nabla s_c))) = \frac{q_c}{\rho_c} \tag{11}$$

여기서 d 는 혼합에 의한 확산유동을 나타내는 함수이고, 확산유동은 확산계수와 포화도에 의존한다.

2.3. 압력식과 포화도식의 분할

식 (8)과 식(11)은 비선형적으로 강하게 결합되어 있기 때문에 이렇게 결합된 식을 해결하기 위해서는 분할법을 통해 수치해석적으로 접근해야 한다. 본 연구에서는 유한체적법을 이용하여 압력식과 포화도식을 분할하고자 하였다[5].

먼저 압력식의 분할을 위해 식 (8)을 적분하면 식 (12)와 같다.

$$-\int_{\partial\Omega_i} \lambda(s_i^k) \nabla p^{k+1} \cdot d\mathbf{v} = \int_{\Omega_i} q dx \tag{12}$$

여기서 Ω_i 는 계 Ω 의 격자셀이고, k 는 시간단계(time step)를 나타낸다. 셀 경계에 대한 적분 근사값은 이후에 취급할 2점 유동 근사법을 통해 구할 수 있다.

다음으로 포화도식의 분할을 위해 식 (11)을 분할하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\phi_i}{\Delta t} (s_i^{k+1} - s_i^k) \\
 & + \frac{1}{|\Omega_i|} \sum_{j \neq i} (\theta F_{ij}(s^{k+1}) + (1-\theta)F_{ij}(s^k)) = \frac{q_i(s_i^k)}{\rho}
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서 Δt 는 시간간격(time period)을 나타내고, $F_{ij}(s)$ 는 다음과 같다.

$$F_{ij}(s) \simeq \int_{\gamma_{ij}} f(s)_{ij} (v_{ij} + d_{ij}(s)) \cdot n_{ij} dv \tag{14}$$

여기서 γ_{ij} 는 인접한 셀 사이의 접점을 나타내고, n 은 경계 $\partial\Omega$ 의 방향을 갖는 정상벡터(normal vec-

tor)를 나타낸다.

이와 같이 압력과 포화도의 변화는 시간에 따른 동적함수로써 표현이 가능하고, 수치해석적으로 인접한 셀의 평균값을 이용해 반복적으로 계산함으로써 압력과 포화도를 계산하게 된다.

2.4. 2점 유동 근사법

압력과 포화도를 구하기 전에 먼저 유체의 속도 (v)를 구해야 한다. v 를 구하기 위해 2점 유동 근사법을 사용하였다.

식 (1) 과 식 (2)를 결합하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot v = \nabla \cdot \left(-\frac{k}{\mu} \nabla p\right) = \frac{q}{\rho} \quad (15)$$

이를 이용하여 각 셀의 물질수지식을 세우면 식 (16)과 같다.

$$\int_{\Omega_i} \left(\frac{q}{\rho} - \nabla \cdot v\right) dx = 0 \quad (16)$$

발산정리(divergence theorem)를 이용하여 식 (16)을 정리하면 식 (17)과 같다.

$$\int_{\partial\Omega_i} v \cdot n \, dv = \int_{\Omega_i} \frac{q}{\rho} \, dx \quad (17)$$

2점 유동 근사법을 적용하기 위해 식 (15)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$-\nabla \cdot \lambda \nabla p = \frac{q}{\rho} = f, \quad \lambda = \frac{k}{\mu} \quad (18)$$

이로부터 셀의 두 점 i, j 의 셀 평균, p_i, p_j 값을 이용하여 v 를 식 (19)와 같이 근사할 수 있다.

$$v_{ij} = - \int_{\gamma_{ij}} \lambda \nabla p \cdot dv \quad (19)$$

다음으로 p 의 변화도(gradient)를 나타내기 위해 식 (20)과 같이 근사한다.

$$\nabla p = \delta p_{ij} = \frac{2(p_j - p_i)}{\Delta x_i + \Delta x_j} \quad (20)$$

여기서 Δx_i 와 Δx_j 는 x 축의 각 셀을 나타낸다. 이를 식 (19)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$v_{ij} = \frac{2(p_j - p_i)}{\Delta x_i + \Delta x_j} \int_{\gamma_{ij}} \lambda \, dv \quad (21)$$

식 (21)을 통해 λ 를 근사하면 v_{ij} 또한 근사할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 저류층의 상세한 투과율은 측정이 어렵기 때문에 대부분의 저류층 모델링에서는 투과율을 상수로 가정하고 있다[6].

각 셀의 λ 를 조화평균($\lambda_{ij} = (\Delta x_i + \Delta x_j) \left(\frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,ij}} + \frac{\Delta x_j}{\lambda_{j,ij}}\right)^{-1}$)으로 나타내면 식(21)의 분모가 소거되어 간단한 형태로 식 (22)와 같이 정리할 수 있다.

$$v_{ij} = 2\gamma_{ij} \lambda_{ij} \left(\frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,ij}} + \frac{\Delta x_j}{\lambda_{j,ij}}\right)^{-1} (p_i - p_j) \quad (22)$$

여기서 구한 근사값, v 를 식 (12)과 식 (13)에 대입하면 압력과 포화도를 각각 식 (23)과 식 (24)와 같이 근사할 수 있고, 이를 반복적으로 계산하여 격자셀의 압력과 포화도를 산출할 수 있다.

$$p_i^{k+1} = p_i^k + 2\gamma_{ij} \lambda_{ij} \left(\frac{\Delta x_i}{\lambda_{i,ij}} + \frac{\Delta x_j}{\lambda_{j,ij}}\right)^{-1} \quad (23)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + \frac{\Delta t}{\phi_i |\Omega_i|} \sum_j (q - f_c(s)_{ij} (v_{ij} + d_{ij} \Delta s_i)) \quad (24)$$

식 (24)에서 가장 중요한 인자 중 하나는 혼합에 의한 확산(d)인데, 이는 인접한 셀의 포화도 차이에 영향을 받기 때문에 인접한 셀에서 계산된 포화도 값을 저장하여 포화도 차이를 계산할 수 있도록 알고리즘을 식 (25)와 같이 구성하였다.

$$d = \frac{d_{avg}}{N^2 (s_i - s_{i-1})} \quad (25)$$

여기서 d_{avg} 는 이산화탄소의 평균 확산계수로, $8.01 \times 10^{-6} \text{ (cm}^2/\text{s)}$ 으로 선정하였다[7]. 그리고 N 은 계 내의 셀 개수를 의미한다. 본 연구에서는 저류층 내 이산화탄소의 압력과 포화도 변화를 알아보는 것이 목적이므로, 이산화탄소를 확산물질로 선정하였다.

그리고 원유와 이산화탄소의 혼합 시 발생하는 원유의 점도 감소를 식 (26)과 같이 고려하였다[8]. 유체의 점도는 원유의 경우 8.3 cp (100°C), 이산화탄소의 경우 0.0185 cp (100°C)로 가정하였다.

$$\mu = \mu^{ref} + \alpha \rho^\beta, \quad \alpha = -1.8366 \times 10^{-8}, \beta = 13.992 \quad (26)$$

2.5. 모사조건

모델링 대상인 저류층은 정사각형으로 가정하고, x 축과 y 축을 정규화(normalized)하여 각 32개의 격자로 나누었다. 그래서 (0,0)을 이산화탄소 주입정(injection well)으로, (1,1)을 원유 생산정(production well)으로 하였다. 정규화된 저류층을 가정하였고, 원유 회수량과 이산화탄소 지중저장량의 시간에 따른 비율을 보는 것이 목적이기 때문에 주입정에서 주입속도를 1로 가정하였다. 그리고 물질의 투과율(k)은 측정이 어렵고, 저류층의 특성에 크게 의존하므로 격자마다 0과 1사이의 임의의 값을 갖도록 모델을 구성하였다. 또한 λ 는 유체의 포화도에 의존하기 때문에 매 계산마다 포화도에 따라 값을 식 (27)과 같이 갱신하도록 구성하였다.

$$\lambda_c = s_c^2 / \mu_c, \lambda_o = (1 - s_c)^2 / \mu_o \quad (27)$$

마지막으로 총 시간단계는 10으로 설정하였다. 본 연구에서는 이산화탄소 원유 회수증진의 효과를 보이기 위해 이산화탄소를 주입한 경우를 비롯해 원유를 주입한 경우와 물을 주입한 경우도 모사하였다. 원유와 물을 주입한 경우 원유-원유, 원유-물 사이에는 혼합성이 없기 때문에 확산부분은 무시하였다. 물의 점도는 0.28 cp(100°C)로 가정하였다.

III. 결과 및 고찰

모사조건에 따른 각 경우의 압력과 포화도 변화 그래프는 Fig.1 ~ Fig. 6과 같다.

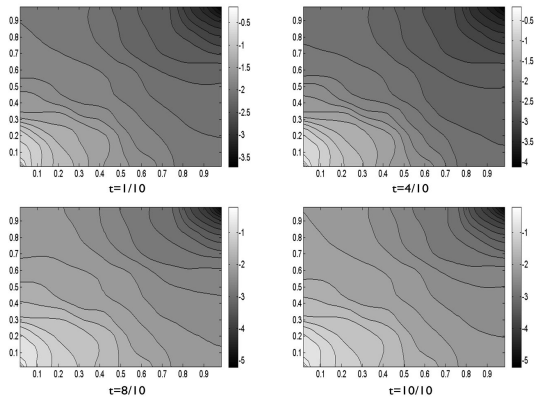


Fig. 1. Pressure profiles of oil flooding.

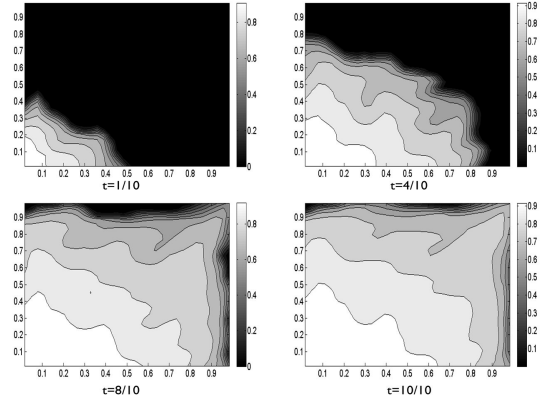


Fig. 2. Saturation profiles of oil flooding.

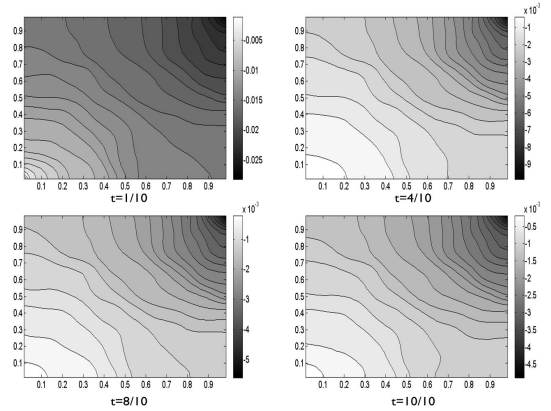


Fig. 3. Pressure profiles of water flooding.

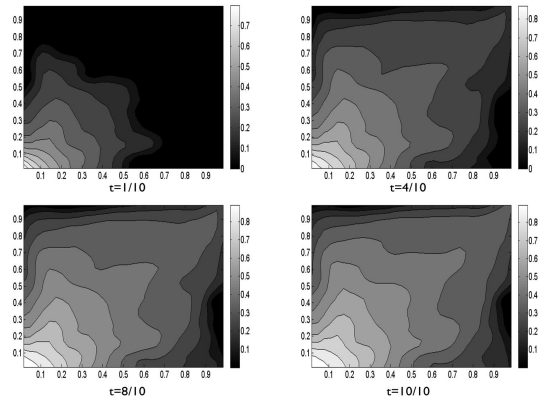


Fig. 4. Saturation profiles of water flooding.

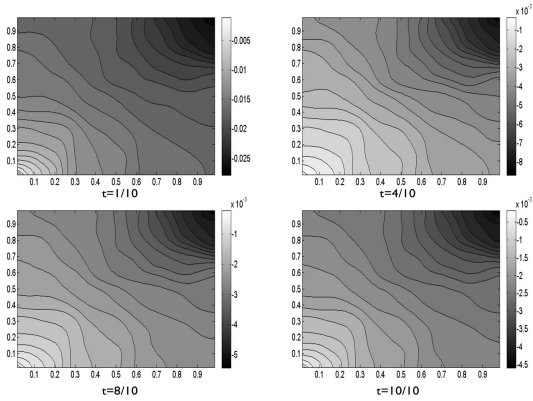


Fig. 5. Pressure profiles of CO₂ flooding.

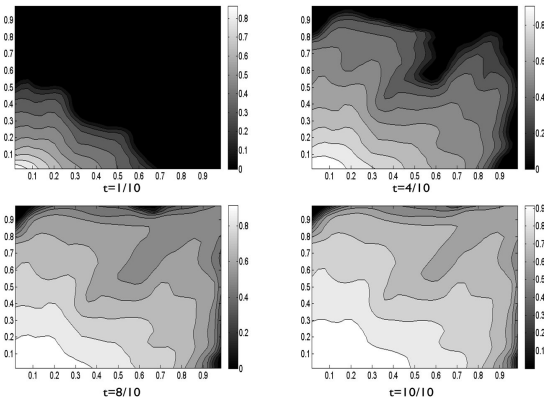


Fig. 6. Saturation profiles of CO₂ flooding.

위의 6개 그림을 비교해보면, 압력의 변화로는 어떤 물질을 주입하는 것이 원유 회수에 더 유리한지 쉽게 확인할 수 없었다. 이것은 비혼합유체나 혼합유체 모두 원유 회수증진에 영향을 미치는 인자가 직접적으로 반영되지 않은 것으로 볼 수 있다. 즉, 압력변화를 나타내는 식 (23)이 식 (2)로부터 구할 수 있는 식과 다르지 않았기 때문으로 보인다. 그러나 원유 회수에 가장 결정적인 역할을 하는 포화도를 살펴보면, 물보다 이산화탄소를, 그리고 이산화탄소보다 원유를 주입했을 경우 저류층 내 주입물질의 포화가 빨리 이루어지고, 원유가 효과적으로 회수되는 것을 알 수 있었다.

원유를 주입하여 원유 회수율을 늘리는 방법은 1970년대까지 종종 사용되긴 했지만 이미 경제성이 없는 것으로 규명되어 현실적으로 불가능하다고 볼 수 있다[1]. 그러나 이산화탄소를 주입하는 방법은

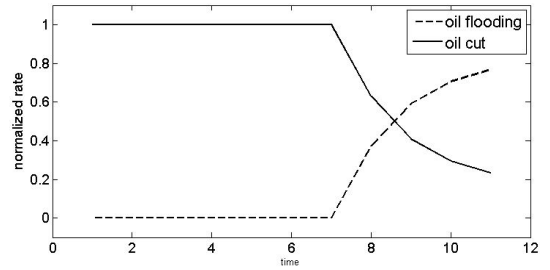


Fig. 7. Production profiles of oil flooding.

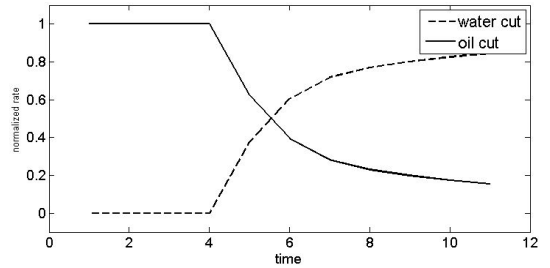


Fig. 8. Production profiles of water flooding.

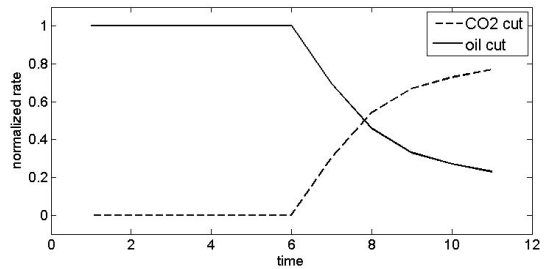


Fig. 9. Production profiles of CO₂ flooding.

지금까지 주로 사용되어 왔던 물을 주입하는 방법보다 원유 회수율이 좋을 것으로 예측되므로, 원유 회수를 증진하고 포집된 이산화탄소를 지중 저장하는데 좋은 해결책이 될 것으로 보인다.

Fig. 1 ~ Fig. 6에서 얻은 결과를 바탕으로 주입물질에 따른 원유 생산량과 주입물질의 지중저장량을 그래프로 나타내면 다음과 같다.

Fig. 7 ~ Fig. 9로부터 이산화탄소를 주입 시에는 물을 주입할 때보다 더 오래 그리고 더 많은 양의 원유(oil cut)를 생산할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이산화탄소 주입 시 어느 정도 시간이 지나면 이산화탄소가 원유와 함께 생산되기 때문에 주입공정은 회분식으로 이루어져야 하며, 효율적인 원유

회수와 지중저장을 위해서는 주입정(injection well)에서의 적절한 주입 절차 및 계획과 생산정(production well)에서 이산화탄소 분리공정의 설계 등이 필요함을 시사하고 있다. 따라서 이를 바탕으로 향후에는 원유 회수공정의 전 과정(life cycle)의 스케줄링이나 제어에 연구를 집중할 필요가 있겠다.

IV. 결론

본 연구에서는 이산화탄소 처리기술 중 하나인 이산화탄소 원유 회수공정을 위한 저류층 모델링을 수행하였다. 저류층 모델링은 기본적으로 다공성 매질을 지나는 유체의 흐름을 다루는 Darcy-Muskat 법칙을 기반으로 하였고, 이산화탄소와 원유 혼합유체의 저류층 내 압력과 포화도 변화를 살펴보았다. 이를 위해 유한체적법 중 하나인 2점 유동 근사법을 사용하였다. 그리고 유체의 혼합성을 고려하기 위해 확산 항을 추가하였으며, 각 격자셀에서 포화도 차이에 의존하는 혼합유체의 확산성을 표현할 수 있도록 하였다.

그 결과, 저류층 내 원유와 물, 이산화탄소를 주입했을 경우 각 주입물질별 시간에 따른 압력과 포화도의 변화를 예측할 수 있었다. 또한 원유 회수에 결정적인 역할을 하는 포화도 측면에서 이산화탄소 주입 방법이 물을 주입하는 방법보다 유리한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 원유 생산량과 이산화탄소 지중 저장량 그래프를 통해 원유 회수공정은 회분식으로 운영되어야함을 확인할 수 있었고, 향후 스케줄링과 제어에 대한 연구가 지속적으로 필요함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 기술혁신사업-산업원천 기술개발사업 중 “CO₂ 수송선 화물탱크/Gas Dome

설계/생산 및 하역 시스템 기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Electric Power Research Institute, *Enhanced Oil Recovery Scoping Study*, Technical report, (1999)
- [2] Douglas, J., “Finite Difference Methods for Two-Phase Incompressible Flow in Porous Media”, *Society for Industrial and Applied Mathematics, Journal on Numerical Analysis*, **20(4)**, 681-696, (1983)
- [3] Douglas, J. and Roberts, J., “Numerical methods for a model compressible miscible displacement in porous media”, *Mathematics of Computation*, **41(164)**, 441-459, (1983)
- [4] Bourgeat, A. and Jurak, M., *Two phase partially miscible flow*, Report, (2006)
- [5] Barth, T. and Ohlberger, M., *Finite volume methods: foundation and analysis*, Encyclopedia of Computational Mechanics, Wiley, (2004)
- [6] Aarnes, J. E., Gimse, T., and Lie, K. A., *An introduction to the numerics flow in porous media using Matlab*, Geometric modelling, numerical simulation, and optimization, Part II, 265-306, (2007)
- [7] Li, Z. and Dong, M., “Experimental Study of Carbon Dioxide Diffusion in Oil-Saturated Porous Media under Reservoir Conditions”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **48**, 9307-9317, (2009)
- [8] Lansangan, R. M., Taylor, M., Smith, J. L., and Kovarik, F. S., “An Improved Viscosity Correlation for CO₂/Reservoir Oil Systems”, *SPE Advanced Technology Series*, **1(2)**, 134-141, (1993)