

해양 지중저장층내 초임계 CO₂ 유동에 대한 전산모사

Numerical Simulation of Supercritical CO₂ Flow in a Geological Storage Reservoir of Ocean

최 항 석
Hang Seok Choi

한국기계연구원 그린환경기계연구본부
Environmental and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(2011년 3월 30일 접수, 2011년 4월 25일 채택)

Abstract : In the present study, a 3-dimensional (3D) numerical model was developed to mimic the micro porous structure of a geological CO₂ storage reservoir. Especially, 3D modeling technique assigning random pore size to a 3D micro porous structure was devised. Numerical method using CFD (computational fluid dynamics) was applied for the 3D micro porous structure to calculate supercritical CO₂ flow field. The three different configurations of 3D micro porous model were designed and their flow fields were calculated. For the physical conditions of CO₂ flow, temperature and pressure were set up equivalent to geological underground condition where CO₂ fluid was stored. From the results, the characteristics of the supercritical CO₂ flow fields were scrutinized and the influence of the micro pore configuration on the flow field was investigated. In particular, the pressure difference and consequent CO₂ permeability were calculated and compared with increasing CO₂ flow rate.

Key Words : Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS), Computational Fluid Dynamics, Micro Porous structure, Supercritical CO₂

요약 : 이산화탄소의 해양 지중저장에 대한 전산모사를 위해 실제 이산화탄소가 저장되는 해양 지중 저장층에 대한 3차원 전산모형을 개발하였다. 특히, 실제 저장층의 3차원 구조를 모사하기 위하여 공극의 크기를 불규칙(random)적으로 부여하는 수치적 방법을 고안하여 3차원 전산모형을 구성하였고, 이를 균일한 공극 구조의 경우와 비교하였다. 이렇게 구성된 3차원 공극모형 내의 초임계 이산화탄소 유동을 시뮬레이션하기 위하여 전산유체역학을 사용하였다. 이러한 초임계 이산화탄소의 시뮬레이션에는 실제 저장층의 환경 즉 온도 및 압력을 동일하게 모델링하여 적용하였다. 공극 구조가 CO₂의 유동에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 세 가지 형태의 3차원 전산모형의 공극 구조 내부를 흐르는 초임계 이산화탄소 유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, 특히 3차원 전산모형의 내부유동에 대한 압력강하 및 투수율을 계산하여 본 모형이 해양 지중저장의 전산모사에 적합한지를 판단하고, 이산화탄소 유량 증가에 따른 초임계 이산화탄소 유동의 특성을 살펴보았다.

주제어 : 이산화탄소 포집 및 저장, 전산유체역학, 미세 공극 구조, 초임계 이산화탄소

1. 서론

최근 지구온난화 및 이에 따른 기후변화문제로 대표적인 온실 가스 중 하나인 이산화탄소를 포집하고 이를 저장하는 기술(CO₂ capture and storage, CCS)에 대한 관심이 높아져가고 있다.¹⁻⁴⁾ CCS기술은 다양한 오염원으로부터 대기중으로 방출되는 이산화탄소를 포집하여 처리하므로, 온실가스를 감축하고, 지구온난화를 막는데 실질적인 도움을 준다. 이러한 CCS기술은 일반적으로 이산화탄소가 발생하는 오염원에서 이를 포집하고, 액화/저장한 후 반영구적인 저장소로 운송하여 압축 저장하는 공정으로 이루어진다. 이 중 포집된 이산화탄소를 처리하는 공정인 이산화탄소 지중저장 공정은 주로 육상의 지하나 해안의 대수층에서 이루어지는데, 효율적인 저장과 저장된 이산화탄소의 유출을 막는 것이 주된 관심사이다.

이러한 지중 저장 공정 중 CO₂ 주입에 대한 안전설계를 위해서는 주입층 및 상부 덮개암 불투수층의 역학적 안정성, 지층내 이산화탄소의 거동 및 누출 예측이 이루어져야

한다. 또한, 지중저장 예측을 위해서는 주입된 CO₂의 상변화에 따른 이상 유동, 부피팽창에 따른 온도변화 및 밀도차에 의한 압력변화 등도 고려되어야 한다. 이러한 지중 저장층내의 초임계 이산화탄소 거동을 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술로는 간단한 Darcy's law를 이용하는 해석기법이 널리 개발되어 왔다.⁵⁾ 그러나 Darcy's law를 이용하는 해석기법의 단점을 보완하고자 이산화탄소의 다상유동을 직접 예측하는 시뮬레이션 기법으로 분자 레벨의 Lattice Boltzmann (LB)해석방법이 사용되고 있다.^{6,7)}

앞서 말한 Darcy's law를 이용하는 시뮬레이션 기법은 암반이나 대수층의 다공매질 내 유동의 흐름을 거시적인 평균 유동에 대한 압력구배의 함수로 계산하므로 미시적인 다공질 구조와 유동의 흐름에 대한 정확한 표현이 불가능하여, 실제 실험치와는 차이를 보이는 경향이 있다. 또한 LB법은 암반 내 다공매질 및 유동의 미시적인 특성을 잘 나타낼 수 있지만, 분자레벨 계산으로 인한 계산 비용이 많이 들고, 이로 인해 현재까지의 기술로는 제한적인 미시공간에 대해서만 계산만이 가능하다는 단점이 있으며, 미시적 유동

† Corresponding author E-mail: hschoi@kimm.re.kr Tel: 042-868-7398 Fax: 042-868-7284

의 다양한 화학적 반응에 대한 시뮬레이션은 아직 힘들다는 단점이 있다. 반면 CFD를 이용한 해석기법은 계산의 경제성과 정확성을 동시에 추구할 수 있는 장점이 있어 현재 연구자들 사이에 기초연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 지중 저장층내 초입계 이산화탄소 유동을 수치해석하기 위하여, 먼저 실제 이산화탄소가 저장되는 해양 지중 저장층에 대한 3차원 전산모형을 개발하였다. 특히, 실제 저장층의 불규칙적인 3차원 공극 구조를 모사하기 위하여 공극의 크기를 불규칙(random)하게 주는 수치적 방법을 고안하여 3차원 전산모형을 구성하였고, 이를 일정한 공극 크기의 경우와 비교하였다. 이렇게 구성된 3차원 전산모형에 대한 초입계 이산화탄소 유동을 시뮬레이션하기 위하여, 전산유체역학을 사용하였다. 초입계 이산화탄소의 시뮬레이션에는 실제 저장층의 환경 즉 온도 및 압력을 동일하게 모델링하여 적용하였다. 공극 구조가 CO₂ 유동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 세 가지 형태의 3차원 전산모형의 3차원 공극 구조 내부를 흐르는 초입계 이산화탄소 유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, 특히 3차원 전산모형의 내부유동에 대한 압력강하 및 투수율을 계산하여 본 모형이 해양 지중저장의 전산모사에 적합한지를 판단하고, 입구 CO₂ 유량을 증가시켜가면서 초입계 이산화탄소 유동의 특성을 살펴보았다. 본 연구의 전산유체역학적인 접근방법은 실제 이산화탄소 주입공정의 안전설계에 도움이 될 수 있는 수정된 Darcy correlation의 예측이 가능하다고 판단된다.

2. 계산 방법

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 미세공극 내 초입계 이산화탄소의 유동해석을 위하여 지배방정식으로 아래와 같은 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 u_i 는 속도, p 는 압력, τ_{ij} 는 점성 응력 텐서이며, 식 (2)에서 응력 텐서 τ_{ij} 과 변형률 텐서 S_{ij} 는 아래와 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \quad S_{ij} = 0.5 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

2.2. 3차원 미세공극 전산모형 및 계산 조건

Fig. 1은 미세 공극들로 연결되어있는 지중 저장층을 모사하기 위한 3차원 미세 공극 구조의 기본 단위 모델이다. 그림에서 공극의 고체입자(grain)는 구 형태이며, 미세 공극 구조는 8개의 고체입자와 그 사이의 공간으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 균일한 고체입자의 크기를 준 경우(A)와 4가지의 고체입자 크기를 무작위로 배열한 경우(B)에 대한 공극 구조들의 3차원 전산모형을 구성하여 계산을 수행하였다. 실제로 계산이 수행되는 공극(pore)구조는 고체입자들로 둘러싸인 전체 공극 구조에서 고체입자들을 뺀 순수한 공극구조에서만 수행되었다. Fig. 1의 단위 공극 모델을 기반으로 서로 다른 세 가지 경우의 공극구조를 형성하

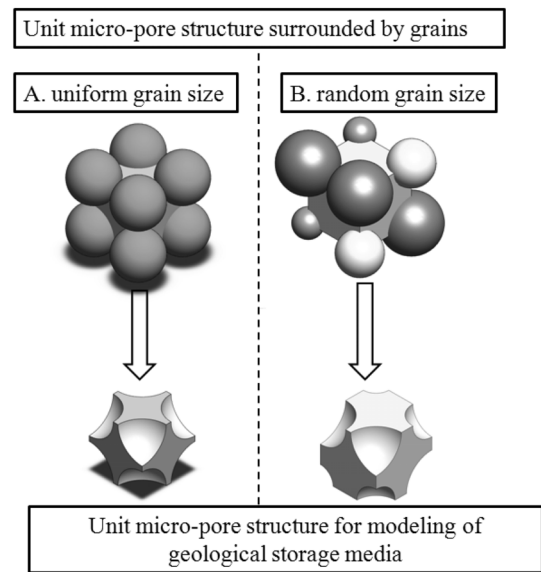


Fig. 1. Unit micro-pore structure for modeling of geological storage media.

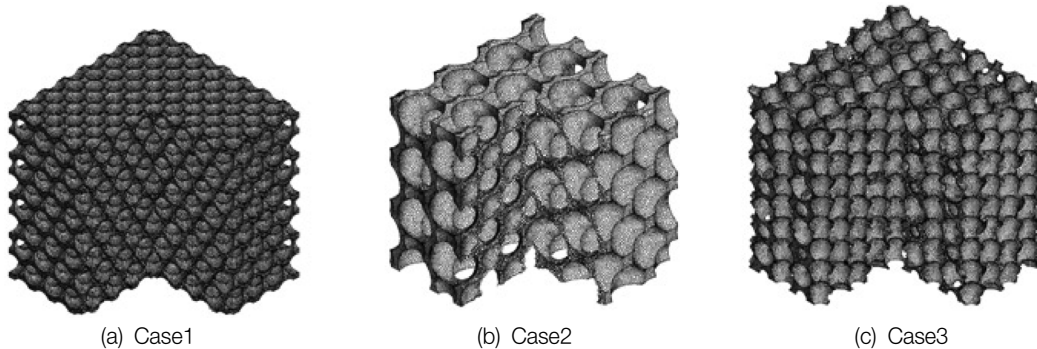


Fig. 2. Computational domain and grid allocation for three different micro porous structure cases.

Table 1. Computational conditions

| Case | Grain size (μm) | Porosity | Characteristic length of porous media (μm) | Total number of grains |
|------|--------------------|----------|--|------------------------|
| 1 | 100 | 0.215 | 800 | 1,128 |
| 2 | 200 | 0.195 | 800 | 162 |
| 3 | 105, 110, 115, 120 | 0.254 | 800 | 810 |

였으며, Fig. 2와 같이 정육면체 구조로 계산 영역을 구성하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 계산 영역 및 계산 격자구조를 나타내는 그림으로, 일정 크기(A)의 2가지 경우(case1과 case2)와 무작위 크기(B) 1가지 경우(case3)에 대한 그림이다. 계산 격자에 사용된 고체입자의 크기 및 공극률 등은 Table 1에 나타나 있다. 계산 격자의 총 수는 격자의존성(grid dependency) 검사를 통하여 세 가지 경우 모두 약 100만개 정도로 설정하였으며, 다면체격자(polyhedrons)를 사용하여 구성하였다.

지중 저장층에서 초임계 이산화탄소의 주입을 전산모사하기 위하여, 유동 경계조건으로 입구는 일정 속도 조건과 출구는 일정 압력조건 및 Neumann조건으로 경계조건을 설정하였다. 그리고 벽면은 점착(no-slip) 조건을 주었으며, 계산영역의 외벽은 대칭(symmetry) 경계 조건을 주어 계산을 수행하였다. 또한 열 경계조건은 이산화탄소 지중 저장층의 초임계 상태를 고려하여, 입구는 313 K로 벽면은 332 K으로 주어졌으며, 주위압력은 100 bar로 주었다. 참고로 초임계 이산화탄소의 경우 온도가 10 K 정도만 변해도, 이산화탄소의 밀도, 점도, 비열, 열전도도와 같은 물성치는 이산화탄소 주입이 이루어지는 지중 저장층에 해당하는 초임계 상태의 물성을 주었으며, Fig. 3과 같이 온도에 대한 함수로 주어졌다. 계산에 사용된 Re수는 입구의 속도와 수력직경을 기준으로 $Re_{inlet} = U_{inlet}D_h/\nu$ 로 구하였으며, $Re_{inlet} = 10$ 에서 $Re_{inlet} = 1,000$ 까지 Re수를 변화시켜가며 계산을

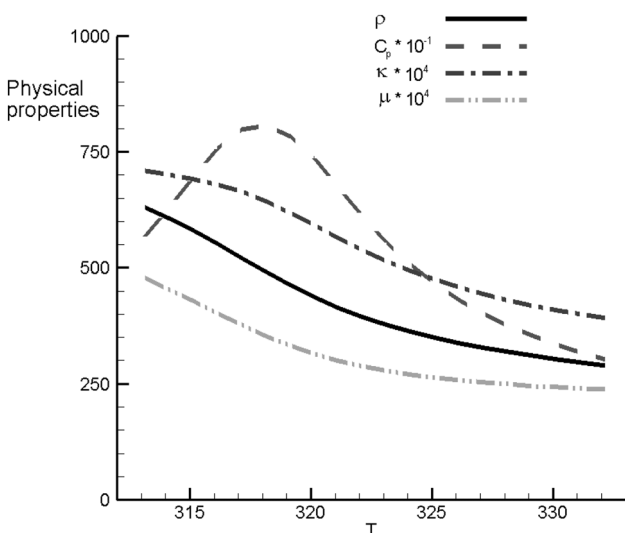


Fig. 3. Physical properties for supercritical CO₂ with varying ambient temperature.

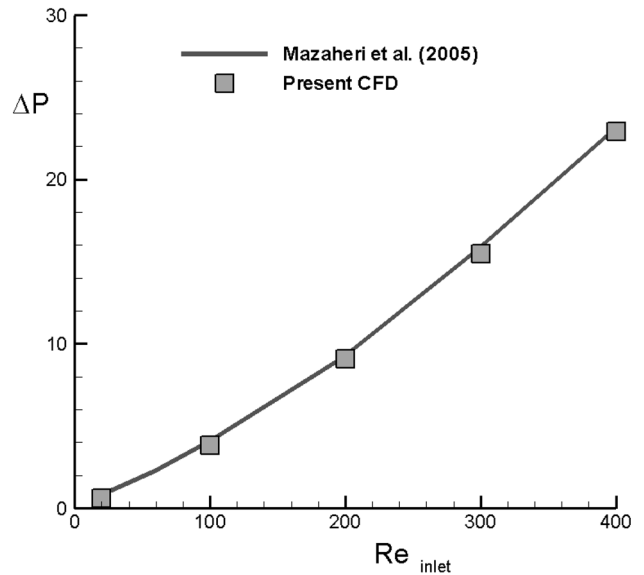


Fig. 4. Comparison of pressure difference with varying inlet Reynolds number.

수행하였다. 본 연구에서 전산해석은 상용코드인 STAR CCM+ Ver. 5.02⁸⁾를 이용하여 수행되었으며, 유한 체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 위의 지배방정식 (1)~(3)을 이산화하였다. 이산화시 각 지배 방정식들의 공간미분에 관한 항들은 이차 풍상 차분법(second-order UPWIND scheme)을 사용하여 차분화 하였다. 또한, 압력장과 속도장의 분리(decouple)를 피하기 위하여 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

본 계산을 수행하기 전 본 연구에서 사용된 계산 방법이 미세공극을 시뮬레이션하는데 적합한지 평가하기 위하여, Mazaheri et al.⁹⁾이 지중 저장층내 이산화탄소 유동에 대한 기초연구를 위하여 고안한 lattice flow-cell model에 대하여 계산을 수행하였다. Fig. 4는 입구 Re수 증가에 따른 압력차(pressure difference)를 비교한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 본 연구의 계산결과는 Mazaheri et al.⁹⁾의 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.¹⁰⁾ 따라서 본 계산에 사용된 계산방법이 본 연구의 목적인 미세공극 전산모형 내 이산화탄소 유동을 계산하는데 간접적으로 적합하다고 판단되었다.

3. 결과 및 고찰

해양 지중 저장층 안을 흐르는 초임계 이산화탄소의 유동을 해석하고, 이산화탄소의 지중 저장 공정 및 저장층을 설계하는데 있어 중요한 설계 변수 중 하나인 투수율을 예측하고, 이러한 결과로부터 본 연구에서 고안된 전산모형이 해양 지중 저장층의 전산모사에 적용 가능한지를 평가하기 위하여 Fontainebleau sandstone에 대한 실험값과 비교/평가하였다. 따라서 Fig. 2에 보여준 서로 다른 세 가지 형상의 3차원 전산모형에 대해 투수율(permeability) 예측 성능을 평가하기 위하여 Jacquín¹¹⁾이 실험한 결과와 비교해 보았다.

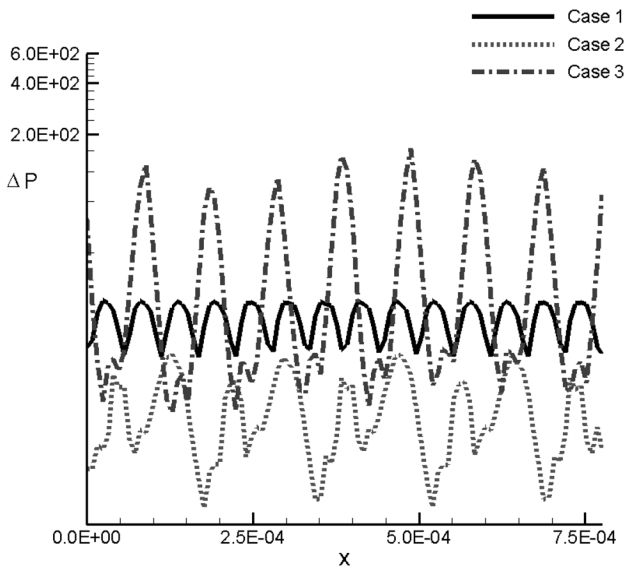
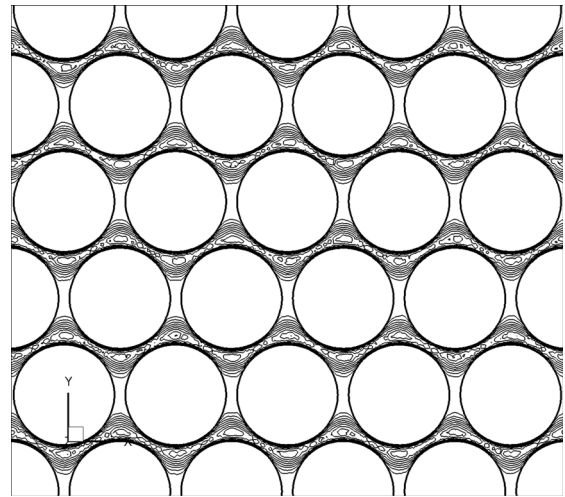


Fig. 5. Distribution of pressure difference in 3D micro porous models for three different cases.

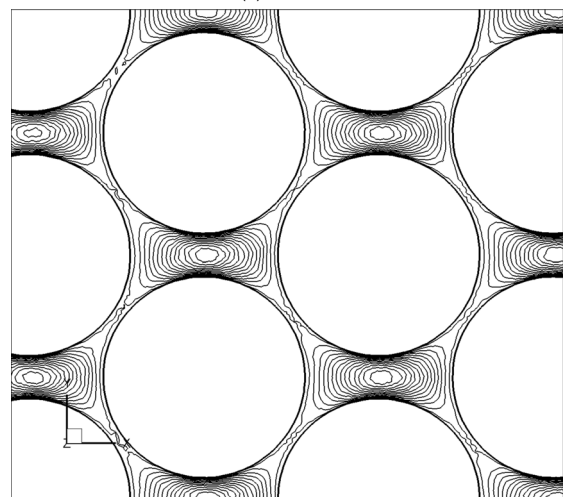
참고문헌 [11]에 나와 있듯이, 투수율을 측정할 대상 지층은 Fontainebleau sandstone이고, 초입계 CO₂의 투수율에 대한 실험값이 매우 제한적이므로, CO₂ 초입계의 상태(phase)를 고려하여 신뢰할만한 실험값을 얻을 수 있는 공기를 대상으로 투수율을 계산하였다. Fig. 5는 Fig. 2의 세 가지 3차원 공극모형 내 유동방향에 수직인 각 (y,z) 단면간의 면적 평균한 압력차(static pressure difference)의 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 case1과 case2의 경우에는 유동방향으로 주기적인 압력강하의 형태를 나타내며, 압력강하 진폭의 최대 및 최소값이 거의 유사한 값을 나타낸다. 반면 case3의 경우에는 case1과 case2의 경우에 비해 압력강하 곡선이 주기적이지 않으며 특히 최대값에서 차이를 나타내는데, 이 경우 수직축을 로그 스케일로 나타내어 차이가 작게 보이거나 실제 현저한 차이를 나타내게 된다. 이는 Fig. 1과 2에서 보여준 바와 같이, 알갱이들의 크기가 불규칙적으로 배열되어 나타나는 현상이라 할 수 있다. 이러한 압력강하 특성을 파악하기 위하여 각 공극 구조의 형상에 대해 유동 특성을 아래와 같이 알아보았다.

Fig. 6은 세 가지 경우의 3차원 공극 구조에 대해 z=0인 단면에서의 유동방향 속도를 나타낸 그림이다. 참고로 그림에서 점선으로 표시된 부분은 음의 속도 분포를 의미한다. Case1의 경우에는 고체 입자사이의 유로를 통해 유동이 형성되고 있음을 알 수 있고, 고체 입자 사이의 수직한 공극에 저속 영역의 공간이 존재함을 알 수 있다. Case2의 경우는 고체 입자사이의 간격이 상대적으로 넓은 공극에서 속도가 가속되는 것을 알 수 있고, 공극의 간격이 좁은 곳에서는 저속의 속도분포를 보인다. 하지만, 두 경우 모두 유동방향으로 주기적인 속도분포를 보인다. 그러나, case3의 경우에는 속도 분포의 주기적인 경향은 보이지 않고, 다른 두 경우에서는 보이지 않았던 공극 내 음의 속도분포(점선 부분)가 발생하게 된다. 이는 공극내에 재순환 유동

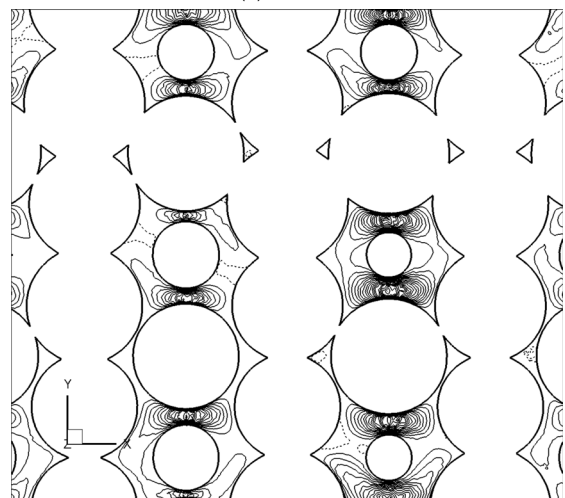
이 형성되었음을 의미하는 것으로, 이러한 불규칙적인 속도 분포 및 재순환류가 공극내 압력강하에 영향을 미치게 된다. 따라서, Fig. 5와 같이 case3의 경우가 압력강하의 주기적인 특성이 사라지며, 진폭 역시 커짐을 알 수 있다.



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

Fig. 6. Contours of streamwise velocity for three different cases.

이러한 압력 강하의 특성이 투수율 예측에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 7에서 위의 세 가지 3차원 공극모형의 경우에 대한 투수율(K)을 계산하여 Jacquin의 실험값과 비교하였다. 여기서, 투수율은 공기에 대한 압축성을 고려하여 아래와 같은 식 (4)으로¹²⁾ 계산하였다.

$$K = 2\mu QLP_0 / [A(P_i^2 - P_0^2)] \quad (4)$$

여기서, μ 는 유체의 점성계수이며, Q 는 유체의 입구 유량, L 은 투수층의 대표 길이, A 는 투수층의 단면적, 그리고 P_0 는 주위 압력이다. 그림에서 보듯이 공극률이 증가할수록 압력 강하가 감소하여 투수율이 증가함을 알 수 있다. Jaquin의 실험결과와는 case3의 경우가 가장 잘 일치하고, case1과 case2의 투수율 값은 실험값보다 크게 예측되었다. 이는 Fig. 5에서 보여준 바와 같이 case3의 경우가 3차원 공극모형의 불규칙한 형상에 의한 압력 손실이 다른 균일한 경우의 압력 손실보다 커서 투수율이 다른 경우에 비해 작다는데 기인한다고 할 수 있다. 또한, Fig. 5에서 압력 손실의 증감 폭이 상대적으로 큰 case1의 경우가 case2의 경우보다 좀 더 투수율이 실험결과에 가깝게 예측되었다. 따라서 실제 지중 저장지층의 투수율을 정확히 예측하기 위해서는, 3차원 모델링한 공극 구조가 지층의 압력손실 특성을 잘 표현할 수 있어야 가능하다고 판단되며, 일정한 크기의 고체입자를 배열하는 것보다, 여러 가지 다양한 크기의 고체입자를 불규칙적으로 배열하는 것이 투수율 예측에 효과적임을 알 수 있다.

앞의 투수율 예측을 기반으로 본 연구에서는 서로 다른 세 가지 형상의 공극모형이 이산화탄소 유동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이산화탄소 유동의 입구 유량을 증가시켜 가면서 각각의 모형내의 이산화탄소 유동에 대해 계산하였다. Fig. 8은 입구 유량 증가에 따른 이산화탄소 유동

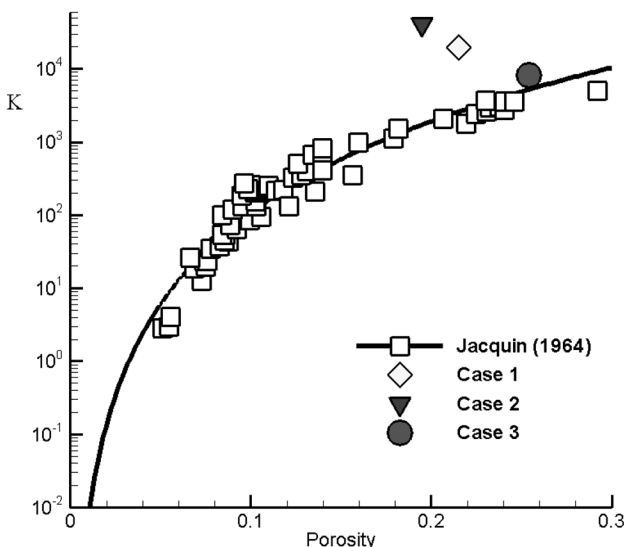


Fig. 7. Comparison of permeability for three different cases with Jacquin's experiment.¹¹⁾

의 입출구 압력강하를 나타내는 그림이며, 그림에서 V_D 는 Darcy velocity를 나타낸다. 또한, 압력차에 대한 CFD 계산값으로부터 상관식(correlation)을 얻기 위하여, 앞서 살펴본 공기 투수율 실험결과와 잘 맞는 case3에 대해서만 일반적인 Darcy correlation식과 Masaheri et al.⁹⁾이 lattice flow-cell 계산 시 제시한 수정된 Darcy correlation식을 구하여 비교하였다. 여기서, Darcy correlation식과 수정된 Darcy correlation식은 각각 아래와 식 (5) 및 (6)과 같이 구하였다.

$$\Delta P = \frac{\mu}{K} V_D \quad (5)$$

$$\Delta P = \frac{\mu}{K} V_D + \frac{\rho}{\eta} (V_D)^2 \quad (6)$$

여기서 식 (6)에 사용된 η 는 관성계수(non-Darcy flow coefficient)이며, 식 (6) 우변의 두 번째 항은 식 (5)의 선형적인 성질만으로는 만족시켜주지 못하는 Darcy velocity가 큰 영역을 보정하기 위하여 추가된 항이다. 그림에서 보듯이 세 가지 경우 모두 Darcy velocity가 증가할수록 압력강하는 커지는 경향을 보인다. 특히, Darcy velocity가 작은 경우에는 세 경우 모두 비슷한 압력강하 값을 가지나, Darcy velocity가 점 점 증가할수록 각각의 압력강하 값의 격차는 벌어지게 된다. 이 경우 case1의 경우가 압력강하 값이 가장 크고, case2의 경우가 가장 작으며 불규칙한 공극 분포인 case3의 경우가 중간 값을 가진다. 또한 case3의 경우, Darcy velocity가 0.1보다 작은 영역에서는 선형적으로 증가하는 Darcy correlation이 CFD결과의 경향과 매우 유사하나, Darcy velocity가 0.1보다 커지면 CFD 계산값과 차이를 보이게 되며 Darcy velocity가 증가할수록 그 차이는 현격히 벌어지게 된다. 이러한 차이는 다음과 같이 설명될 수

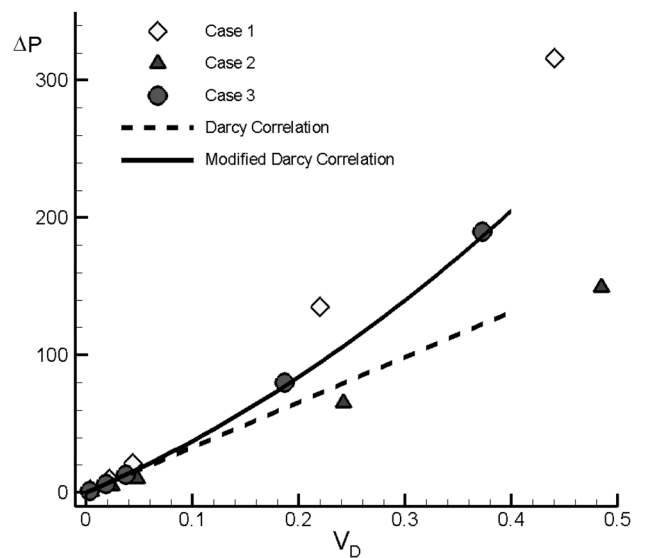


Fig. 8. Distribution of pressure difference for three different cases.

있다. Darcy velocity값이 매우 작을 때는 초입계 이산화탄소의 흐름이 creeping flow와 유사한 경향을 보여 재순환류 같은 유동이 생성되지 않고, 압력 강하는 속도에 비례하게 된다. 하지만 Darcy velocity가 증가하게 되면 Fig. 6 (c)에서 보여준 것과 같이 불규칙한 공극 구조 내에 재순환류가 형성되고, 또한 유속의 증감에 따라 유동이 발달되거나 그렇지 않은 영역이 발생한다. 이러한 유동 구조의 변화에 의해 압력 강하의 특성이 선형적인 상관식과는 다른 경향을 보이게 된다. 이러한 부분이 수정된 식 (6)의 경우 그림에서 보듯이 Darcy velocity변화에 따른 압력 강하 값이 CFD 계산값과 잘 일치한다. 따라서 CFD계산을 통하여 지중 저장층 내 이산화탄소의 유동 특성을 예측하여 수정된 Darcy correlation의 η 값을 구하면 실제 지중 저장층을 설계하는데 수정된 Darcy correlation을 매우 유용하게 사용할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 이산화탄소의 해양 지중저장에 대한 전산 모사를 위해 실제 이산화탄소가 저장되는 해양 지중 저장층에 대한 3차원 공극모형을 세 가지 형태로 구성하여 각각의 유동 특성을 살펴보았다. 특히, 실제 저장층의 복잡한 3차원 미세 공극 구조를 모사하기 위하여 공극의 크기를 불규칙하게 주는 수치적 방법을 고안하여 3차원 공극에 대한 전산모형을 구성하였고, 이를 균일하게 준 경우와 비교하였다. 이렇게 구성된 3차원 전산모형에 초입계 이산화탄소 유동을 시뮬레이션 하기 위하여 전산유체역학을 사용하였다. 초입계 이산화탄소의 시뮬레이션에는 실제 지중 저장층의 환경 즉 온도 및 압력을 동일하게 모델링하여 적용하였다. 3차원 공극모형 내부를 흐르는 초입계 이산화탄소 유동에 대한 해석을 세 가지 형태의 공극 모형에 대해 수치해석을 수행하였으며, 특히 Fontainebleau sandstone의 투수율에 대하여 세 가지 공극 모형에 대한 계산을 수행하여 실험값과 비교하여 불규칙한 공극 구조 모형이 해양 지중 저장의 전산모사에 적합함을 확인하였다. 이러한 모형에 대해 초입계 이산화탄소 유동을 계산한 결과, Darcy velocity 값이 매우 작을 때는 초입계 이산화탄소의 흐름이 creeping flow와 유사한 경향을 보여 재순환류 같은 유동이 생성되지 않고, 압력 강하는 속도에 비례하게 된다. 이 경우 세 가지 모형으로 예측한 압력강하 값이 유사하게 나타나지만, Darcy velocity가 증가하게 되면 압력 강하 값들의 차이가 현저히 나타나게 된다. 특히, 불규칙한 공극 구조 내에서는 재순환류가 생성되고, 또한 유속의 증감에 따라 유동이 발달되거나 그렇지 않은 영역이 발생한다. 이산화탄소의 해양 지중 저장에 대한 안전 설계를 위해서는, 이러한 유동 구조를 정확하게 표현할 수 있는 공극구조 모형이 필요하며, 불규칙한 공극 구조 모형이 이러한 유동 구조를 좀 더 정확하게 표현 할 수 있다고 판단된다. CFD로 예측된 압력 강하를 실제 지중 저장층의 설계에 응용하기 위하여, Darcy correlation의 계수들을 CFD결과로부터 추출하여 선형적인

Darcy correlation과 수정된 Darcy correlation을 구하였다. Darcy velocity가 커지면 압력강하에 대한 비선형 구간이 나타남을 알 수 있었고, 수정된 Darcy correlation이 CFD예측값을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, CFD계산을 통하여 지중 저장층 내 이산화탄소의 유동 특성을 예측하여 수정된 Darcy correlation의 관성 계수인 η 값을 구하면 실제 지중 저장층을 설계하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

사 사

이 과제는 국토해양부 “CO₂ 해양지중저장 기술개발 사업”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. Gaspar Ravagnani, A. T. F. S., Ligerio, E. L. and Suslick, S. B., “CO₂ sequestration through enhanced oil recovery in a mature oil field,” *J. Petroleum Sci. Eng.*, **65**, 129~138 (2009).
2. Bachu, S., “Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: road map for site selection using the transform of the geological space into the CO₂ phase space,” *Energy Conversion and Management*, **43**, 87~102(2002).
3. Borchellini, R., Massardo, A. F. and Santarelli, M., “Carbon tax vs. CO₂ sequestration effects on environomic analysis of existing power plant,” *Energy Conversion and Management*, **43**, 1425~1443(2002).
4. Keith, D. and Lavoie, R., “An overview of Wabamun area CO₂ sequestration project (WASP),” *Energy Procedia*, **1**, 2817~2824(2009).
5. Helmig, R., Class, H., Huber, R., Sheta, H., Ewing, J., Hinkelmann, R., Jakobs, H. and Bastian, P., “Architecture of the modular program system MUFTE-UG for simulating multiphase flow and transport processes in heterogeneous porous media,” *Mathematische Geologie*(1998).
6. Kang, Q., Tsimpanogiannis, I. N., Zhang, D. and Lichtner, P. C., “Numerical modeling of pore-scale phenomena during CO₂ sequestration in oceanic sediments,” *Fuel Proc. Technol.*, **86**, 1647~1665(2005).
7. Suekane, T., Soukawa, S., Iwatani, S., Tsushima, S. and Hirai, S., “Behavior of supercritical CO₂ injected into porous media containing water,” *Energy*, **30**, 2370~2382(2005).
8. STAR-CCM+ user guide version 4.02, 2009, CD-adapco, New York.
9. Mazaheri, A. R., Zerai, B., Ahmadi, G., Kadambi, J. R., Saylor, B. Z., Oliver, M., Bromhal, G. S. and Smith, D. H., “Computer simulation of flow through a lattice flow-cell model,” *Adv. Water Resour.*, **28**, 1267~1279(2005).
10. Choi, H. S., Choi, Y. S., Park, H. C., Cheol, H., Kang, S.

- G., Cho, M. I. and Kim, Y. H., "The characteristics of CO₂ flow and thermal fields in a porous media," Proc. IHTC14, 1~6(2010).
11. Adler, P. M., Jacquin, C. G. and Quiblier, J. A., "Flow in simulated porous media," *Int. J. Multiphase Flow*, **16**, 691~712(1990).
12. Bloomfield, J. P. and Williams, A. T., "An empirical liquid permeability-gas permeability correlation for use in aquifer properties studies," *Quarterly J. Eng. Geol.*, **28**, S1431~S150(1995).