

이미징기술을 활용한 코어규모의 다상유체 유동 특성화: 이산화탄소 지중저장 연구에의 적용

김구영*

한국지질자원연구원 전략기술연구본부 CO₂지중저장연구단

Use of an Imaging Technology for Characterizing Core-scale Multiphase Flow: Application to CO₂ Geological Storage

Kue-Young Kim*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Climate Change Mitigation and Sustainability Division

Abstract

Imaging technologies are applied at various geological scales including pore scale, core scale and intermediate scale in order to characterize pore space of rocks as well as to map the fluid distribution in porous media. This technical report presents experimental results using core-flooding apparatus suited with imaging technology. Three different core samples, that are homogeneous, fractured and heterogeneous cores, were used to assess the two-phase fluid migration behavior as CO₂ displaces resident brine. We show that imaging technology can be effective in characterizing salt-precipitation, capillary pressure and spatio-temporal variation of trapping mechanisms.

Keywords: CO₂ geological storage, imaging technology, core-scale, trapping mechanism

초 록

이미징 기술은 매질 자체의 구조특성 뿐만 아니라 유체의 유동특성을 분석하기 위해 공극규모, 코어규모, 그리고 중규모에서 다양하게 활용되고 있다. 본 기술보고에서는 코어규모에서 유동실험과 이미징 기술을 연계하여 균질매질, 균열매질, 그리고 불균질매질에서의 이산화탄소(CO₂) 유동 특성과 함께 CO₂ 주입시 주입관경 주변에서 발생할 수 있는 염침전 현상, 균질매질과 균열매질에서의 모세관압 평가, 그리고 CO₂ 주입이 완료된 이후 나타나는 포획메커니즘 평가 등에 대해 살펴보았다. 이미징기술을 통해 코어내에서 시간에 따른 CO₂ 플룸을 이미지화 함으로써 유동특성을 분석할 수 있으며, 특히 균열이 포함된 매질과 불균질한 매질에서의 유동 및 저장특성을 평가할 수 있다.

주요어: 이산화탄소 지중저장, 이미징기술, 코어규모, 포획메커니즘

서론

이산화탄소(CO₂) 지중저장 기술은 대기중 CO₂ 배출을 저감할 수 있는 주요 기술이며 (IPCC, 2005), 기술의 검증 및 상용화를 위해 파일럿(~10 Kt/year), 데모(~100 Kt/year),

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Kue-Young Kim
E-mail: kykim@kigam.re.kr

Received: 11 January, 2018
Revised: 21 February, 2018
Accepted: 26 February, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상용규모(>1 Mt/year)의 실증사업이 진행되고 있다(Michael et al., 2010). 현장실증 연구와 함께 실내실험 및 수치모델링 연구가 유동, 역학, 화학반응 등 다양한 관점에서 진행중에 있으며, 특히 실내실험의 경우 실제 유체의 유동양상과 포획과정을 특성화하기 위해 이미징기술이 많이 활용되고 있다. 미세단층촬영(micro-CT)을 이용하여 처음으로 암석내 공극구조를 3차원으로 영상화(Flannery et al., 1987)하고, 공극내 유체의 분포를 이미지화(Coles et al., 1998)한 이래 많은 후속 연구가 진행되었다.

불균질한 매질에서 CO₂와 물(염수)의 유동 및 포획 메커니즘을 이해하기 위해서는 공극규모(pore scale)에서부터, 코어규모(core scale), 중급규모(intermediate scale), 그리고 현장규모(field scale)에 이르기까지 다양한 규모에서의 물리, 화학적 프로세스에 대한 이해가 필요하다.

물(염수)로 포화된 지층에 CO₂를 주입하게 되면 기본적으로 이상유동(two-phase flow) 환경이 되며, CO₂가 포획되는 과정은 공극구조, 습윤성(wettability), 그리고 CO₂와 매질의 접촉각 등에 의해 결정된다(Valvatne and Blunt, 2004). 이러한 프로세스를 이해하고 정량화하기 위해서는 개별 공극을 이미지화 할 수 있는 공극규모(~ μm)의 연구가 요구된다(Blunt et al., 2013; Cnudde and Boone, 2013; Wildenschild and Sheppard, 2013).

반면, 코어규모(~cm)에서 유체의 포화도를 측정하는 경우 수만개의 공극에서의 평균 포화도값을 제공한다(Krevor et al., 2015). 코어규모의 연구를 통해 기본적으로 상대투과율(Bachu and Bennion, 2008; Krevor et al., 2012; Akbarabadi and Piri, 2013), 모세관포획(Iglauer et al., 2011; Krevor et al., 2011; Pentland et al., 2011), 그리고 불균질매질에서의 유동특성(Krause et al., 2011; Pini and Benson, 2013; Li and Benson, 2015; Hingerl et al., 2016) 등을 평가할 수 있다.

중급규모(~m)의 경우 실험실에서 수 미터 스케일의 탱크모델을 이용한다(Agartan et al., 2015; Trevisan et al., 2017). Trevisan et al. (2017)의 경우 2.44×0.5 m의 탱크모델을 이용하여 불균질한 매질에서 CO₂ 플룸의 유동 양상과 포획양을 특성화 하였다. 이때 CO₂ 포화도를 정량화하기 위해 X-선 스캐너를 활용하였다. 이러한 중급규모 실험의 경우, 공극규모나 코어규모에 비해 조금 더 큰 스케일에서의 분석이 가능한 장점이 있는 반면, CO₂ 주입/저장층의 압력환경(~10 MPa)을 재현할 수 없는 단점이 있다. 즉 CO₂의 경우 초임계상태를 만들지 못하기 때문에 초임계 CO₂와 물(염수)을 대신하여 유사 유체(surrogate fluid; 예: Soltrol 220과 Glycerol-water)를 사용한다.

본 기술보고에서는 균질한 베리아 사암(Berea sandstone), 균열이 포함된 코어시료, 그리고 불균질한 사암 등 다양한 코어시료를 대상으로 CO₂의 유동양상과 포획메커니즘 등에 관한 연구결과와 함께 이미징기술을 활용한 코어유동실험을 통해 CO₂ 지중저장연구에의 적용성을 소개하고자 한다.

이미징 기술의 종류

Linear X-선

X-선 튜브(X-ray tube)에서 방출된 X-선은 매질을 통과하면서 일부는 흡수되고 나머지는 투과하게 되는데, 그 양은 감지부(detector)에서 측정한다. X-선 이미징 기술은 X-선 강도(intensity)의 감쇠정도가 매질의 밀도에 비례하는 원리를 이용하여 영상화 하는 기술이다(Wildenschild et al., 2002). 이를 이용하면 코어시료내의 유체의 포화도를 측정할 수 있으며, 따라서 이상유동에서 상대투과율 측정과 함께 실시간으로 유체의 유동 특성을 평가할 수 있다(Oh et al., 2013; Oh et al., 2015; Oh et al., 2017; Kim et al., 2018).

X-선 단층촬영(CT)

X-선 단층촬영 기술은 3차원 입체영상을 제공하며, 해상도에 따라 의료용 단층촬영(medical-CT)과 미세단층촬영(micro-CT)으로 구분된다. 의료용 단층촬영의 경우 해상도는 100-500 μm 범위를 가지며, 시료는 고정되어 있는 상태에서 X-선 소스와 감지부가 회전하며 촬영을 한다. 주로 코어규모($\sim\text{cm}$)의 CO_2 지중저장 연구에 많이 활용되고 있다(Krevor et al., 2012; Pini et al., 2012). 미세단층촬영 역시 CO_2 지중저장 연구에서 많이 활용되어지고 있으며, 주로 공극규모($\sim\mu\text{m}$)의 연구에 사용된다(Gouze and Luquot, 2011; Berg et al., 2013; Blunt et al., 2013; Wildenschild and Sheppard, 2013). 미세단층촬영의 경우 공간적인 해상도가 $\sim\mu\text{m}$ 정도이며, 역시 3차원의 이미지를 제공한다. 이와 같은 고해상도 이미징 기술은 CO_2 유동 뿐만 아니라 공극내 유체의 접촉각(contact angle)을 측정하고(Armstrong et al., 2012), 화학적반응에 의해 공극구조의 변화까지 평가할 수 있다(Menke et al., 2016).

핵자기공명(nuclear magnetic resonance, NMR)

핵자기공명 역시 X-선 분석과 마찬가지로 비파괴분석 방법이며, 매질내에서 유체의 포화도를 이미지화 하는데 활용된다(Mitchell et al., 2013; Manceau et al., 2015; Prather et al., 2016). NMR은 탐사분야에서 공내검층(wellbore logging) 도구로 많이 활용되어져 왔으며, 지층내에 분포하는 유체의 특성을 평가하는데 이용된다(Mitchell et al., 2013). NMR의 신호강도는 코어시료내의 유체의 부피에 선형비례하는 관계를 이용하여 매질의 공극률과 유체의 포화도를 측정한다. Manceau et al. (2015)는 사암을 대상으로 물성(공극률과 투과계수) 및 이상유동 특성을 NMR을 이용하여 평가하였으며, 사암내에 포함되어 있는 탄산염광물이 화학반응에 의해 용해되는 현상을 정량적으로 분석하였다. Prather et al. (2016)는 베리아 사암을 대상으로 NMR을 이용하여 CO_2 가 공극내에서 잔류포획 메커니즘을 평가한 바 있다.

시스템 구성

코어유동시스템은 일반적으로 세 개의 파트, 즉 코어 상류부, 코어 홀더부, 그리고 코어 하류부로 구성된다. Fig. 1은 본 기술보고에서 소개하는 연구사례에 사용된 시스템이며, 코어 상류부는 CO_2 와 물(염수)을 주입할 수 있는 시린지펌프와

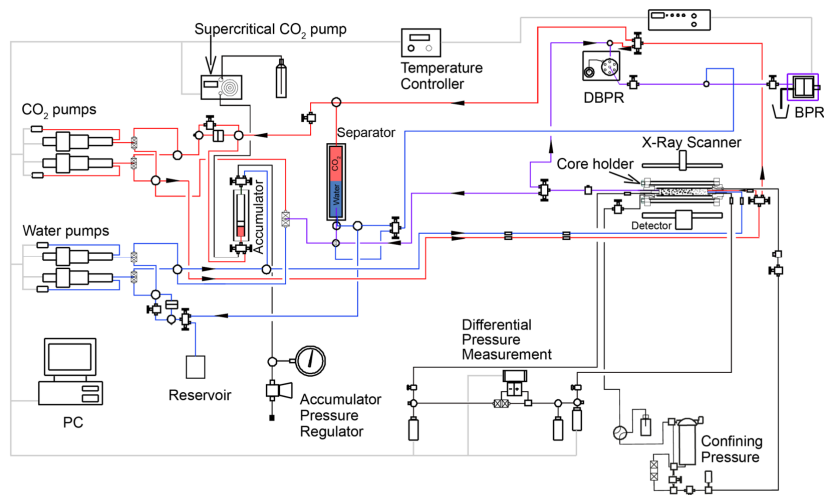


Fig. 1. A schematic diagram of the core-flooding experimental apparatus.

유체의 온도를 제어할 수 있는 가열부(heat coil)로 구성되어 있다. 코어 홀더부는 코어시료를 장착하고 가압할 수 있는 코어홀더와 코어내 유체의 포화도를 측정할 수 있는 Linear X-선 스캐너로 구성되어 있으며, 코어홀더의 양 끝단에는 압력과 온도 측정장치가 설치되어 있다. 마지막으로 코어 하류부에는 압력을 제어할 수 있는 후방가압장치가 구성되어 있다. 실험 목적에 따라 flow through 실험의 경우 유체는 유출부로 이동되며, 순환실험의 경우 유체는 상분리기(phase separator)로 이동하게 된다.

다상유체의 포화도 산정

X-선 스캐닝 시스템은 X-선 튜브와 감지부로 구성되어 있다. 감지부는 0.4 mm 해상도의 센서가 128개씩 2개의 열로 구성되어 있다. 스캔 데이터는 16비트 포맷으로 0-65,535의 범위로 나타나며, CO₂의 포화도는 다음 식에 의해 결정된다 (Oh et al., 2013).

$$S_{CO_2} = \frac{I_{exp} - I_{brine.sat}}{I_{CO_2} - I_{brine.sat}} \quad (1)$$

위 식에서 I_{CO_2} 와 $I_{brine.sat}$ 은 각각 CO₂와 염수로 포화되었을때의 회색조값(gray scale intensity)이며, I_{exp} 는 실험에 의해 나타난 강도(intensity)이다.

연구사례

본 절에서는 코어유동실험에 이미징기술을 활용한 CO₂ 지중저장 연구 사례(Oh et al., 2013; Oh et al., 2017)들을 소개하고자 한다. 먼저 균질매질, 균열매질, 그리고 불균질매질에서 CO₂의 유동특성을 살펴보고, CO₂ 주입시 주입관정 주변에서 발생할 수 있는 염침전 현상, 균질매질과 균열매질에서의 모세관압 평가, 그리고 CO₂ 주입이 완료된 이후(post-injection period) 나타나는 포획메커니즘 평가 등에 대한 예를 살펴보기로 한다.

CO₂ 유동특성 평가

이미징 기술을 활용하면 우선 CO₂의 포화도를 정량적으로 평가할 수 있으며 시간에 따른 포화도의 변화를 알 수 있다. 본 절에서는 균질매질, 균열매질, 그리고 불균질매질에서의 CO₂ 유동 특성에 대해 살펴보았다.

균질매질과 균열매질의 경우 베리아 사암을 이용하였으며, 직경 38 mm, 길이 150 mm 크기로 성형하였다. 실험에 사용된 베리아 사암은 대부분 석영으로 구성되어 있으며 공극률은 20%, 투과계수는 $1.7 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 의 값을 보였다. 균열매질의 경우 동일한 베리아 사암에 대해 코어시료 중심을 장축 방향으로 커팅하여 하나의 인공적인 균열을 생성하였다. 불균질매질의 경우, 한국지질자원연구원에서 CO₂ 지중저장 연구를 위해 운영하고 있는 테스트베드(포항지질자원실증연구센터 내)의 사암을 사용하였다. 테스트베드에는 약 500 m 심도의 주입관정 한 개와 모니터링 관정 두 개가 설치되어 있으며, 사암층으로 구성된 지층에서 코어시료를 채취하여 길이 70 mm, 지름 38 mm 크기로 성형하였다. 입자분석결과 샌드와 실트가 교호하고 있으며, 코어시료의 공극률은 23%, 투과계수는 $23 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 의 값을 가진다. 세 경우 모두 실험 조건은 심부 1 km를 가정하여 10 MPa, 40°C 조건에서 이루어졌으며, 코어시료를 염수로 포화시킨 후 CO₂를 주입하였다.

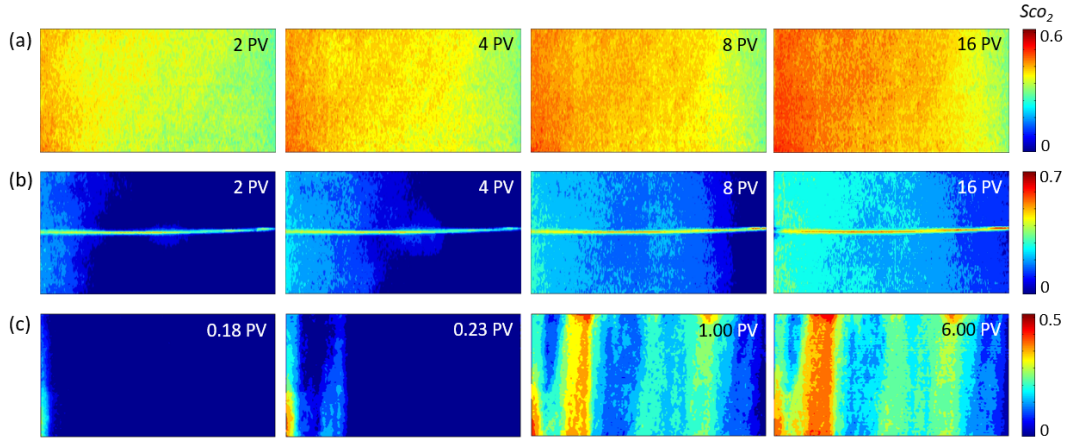


Fig. 2. Snap shots of the CO₂ saturation profiles at four different injection pore volumes during CO₂ flooding injection for (a) homogeneous core, (b) fractured core, and (c) heterogeneous core (not to scale) (Oh et al. 2013; 2017).

균질매질의 경우, 4개의 다른 주입율($q=0.2, 1, 5, 10$ mL/min)을 적용하였다. 전체적으로 피스톤 형태로 초임계 CO₂가 염수를 밀어내면서 코어를 포화시키며, 코어 규모임에도 불구하고 약한 부력(buoyancy) 현상을 보였다(Fig. 2a). 안정화된 후 코어 상류와 하류부에서의 압력차(ΔP)는 ~ 13 kPa의 값을 보였다.

균열매질의 경우, 8개의 다른 주입율($q=1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10$ mL/min)을 적용하였다. CO₂는 주입과 동시에 균열을 따라 염수를 밀어내며 유동한 후 서서히 기질부(matrix)로 침투해 들어간다(Fig. 2b). 이는 균열에서의 투과계수가 크며, 모세관유입압력(capillary entry pressure)이 낮기 때문이다. 균열 내에서의 CO₂ 포화도는 균열간극(aperture)과 거칠기(roughness)에 따라 0.3-0.7의 범위의 큰 변화폭을 보였다. 균열매질에서의 ΔP 는 ~ 6 kPa의 값을 보였으며, 균질매질에 비해 약 절반의 압력상승을 보였다.

불균질매질의 경우, 2개의 다른 주입율($q=0.1, 1.0$ mL/min)을 적용하였으며, 매질의 불균질성에 의해 CO₂ 포화도의 공간적 분포도가 다양하게 나타났다(Fig. 2c). 코어 주입부에서 CO₂가 주입됨에 따라 CO₂가 공극내 염수를 대체하며 침투해 들어가며 높은 모세관압(P_c) 영역을 만나면 우회해서 유동한다. 낮은 주입율($q=0.1$ mL/min)의 경우, 코어 전반에 걸쳐 CO₂ 포화도는 0.05-0.5 범위에서 변화하였다. 상대적으로 높은 CO₂ 포화도(>0.4)는 샌드층(10-20 mm)에서 관측되어졌으며, 낮은 포화도(<0.2)는 실트층(20-30 mm)에서 관측되어졌다. 높은 주입율($q=1.0$ mL/min)의 경우에도 CO₂ 포화도 분포특성은 유사하게 나타났으며, 다만 높은 주입율로 인해 코어 전반에 걸쳐 더 높은 포화도값을 보였다. 주입율이 CO₂ 포화도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 두 개의 서로 다른 주입율에 의한 CO₂ 포화도값의 차(Contrast of CO₂ saturation: $\Delta S_{CO_2} = S_{q=1.0} - S_{q=0.1}$)를 계산하였다. 그 결과 ΔS_{CO_2} 값은 실트층(높은 P_c)에서 약 0.2의 값을 보이며 상대적으로 높은 값이 관측되었으며, 샌드층(낮은 P_c)에서 약 0.05의 값을 보이며 상대적으로 낮은 값이 관측되었다. 즉, 불균질매질의 경우 높은 P_c 영역에서 주입율에 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

염침전 현상 평가

초임계 CO₂를 염수층에 주입하게 되면 주입관정 주변에 dry-out zone이 형성되며, 염침전(salt-precipitation)이 발생한다(Giorgis et al., 2007; Pruess and Müller, 2009; Kim et al., 2012; Miri and Hellevang, 2016). 실제 CO₂ 지중저장 프로젝트인 Ketzin(독일)과 Snøhvit(노르웨이) 프로젝트에서 주입에 의한 영향에 추가적인 압력상승이 염침전에 의한 것으로 보고 있다(Baumann et al., 2014; Grude et al., 2014). Ketzin 프로젝트의 경우 펄스 중성자 감마(pulsed neutron-gamma)

검층을 통해 1 m 폭의 염침전을 확인한 바 있으며, Snøhvit 프로젝트의 경우 수위강하시험(fall-off test)을 통해 주입관정 주위에 염침전에 의한 저투수층 발생을 확인한 바 있다.

코어규모에서의 염침전 평가를 위해 균질매질 시료를 사용하였으며, 초기 염수로 포화된 코어에 CO₂를 q=5 ml/min의 주입율로 24 pore volume (PV) 주입하였다. CO₂ 주입이 진행됨에 따라 CO₂ 포화도가 전체적으로 증가하였으나, 주입부 인근에서는 반대로 CO₂ 포화도가 감소하는 현상이 나타났다(Fig. 3). 실험이 종료된 후 코어의 상단부를 대상으로 주사전 자현미경(scanning electron microscope, SEM) 이미지를 분석한 결과 염(NaI와 NaCl)이 침전되어 있음을 확인하였다. 즉, 염침전으로 인해 X-선의 강도가 감쇠되며, 코어 상단에서 낮은 CO₂ 포화도 값을 보이게 된다. 이러한 현상을 통해 코어유동실험이 진행되는 동안 염침전 발생여부와 dry-out zone의 범위 등을 평가할 수 있다.

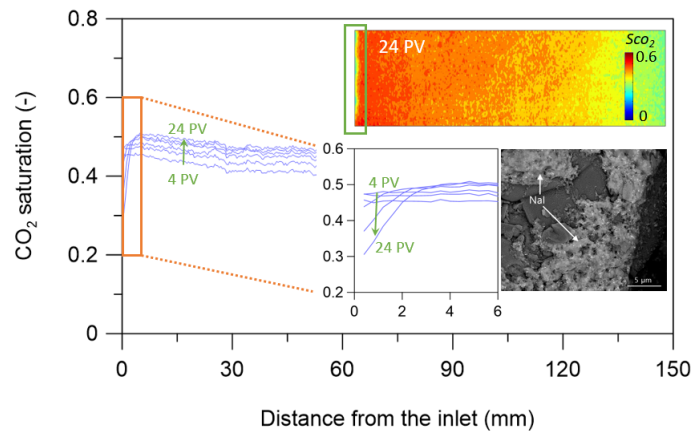


Fig. 3. Vertically-averaged CO₂ saturation profiles during CO₂ injection and indications of salt-precipitation at the core inlet.

모세관압 평가

이상유동에서 모세관압 특성은 상대투과율과 함께 유체유동과 포획에 영향을 미치는 주요 파라미터이다. 코어유동실험과 이미징기술을 통해 균질한 매질에서 모세관압을 평가하는 방법론이 제안된 바 있다(Pini et al., 2012). Fig. 4a는 물로 포화된 코어시료에 CO₂를 주입하여 정상상태(steady-state)가 되었을 때 코어내 CO₂와 물의 압력분포를 나타낸 것이다. 상류부의 압력은 P₁, 하류부의 압력은 P₂이며, 각각은 CO₂와 물의 압력이며, P_{CO₂}와 P_w의 차가 모세관압(P_c)이 된다.

이 방법을 응용하여 균열매질을 대상으로 기질부와 균열부의 모세관압을 평가하였다. Fig. 4b는 균질매질과 균열매질 코어의 기질부와 균열부에서 수포화도에 따른 모세관압을 도시한 그림이다. 균질매질의 경우 수포화도가 0.7과 0.6일 때 각각 3.5 kPa 과 4.0 kPa의 값을 보였다. 이후 수포화도가 0.45일 때 P_c는 급격히 증가하며 13 kPa까지 증가하였다. 균열매질의 경우 P_c가 3.5 kPa일 때 CO₂는 균열부에 존재하는 염수만을 밀어냈으며, P_c가 5 kPa로 증가하였을 때 CO₂가 기질부로 침투했다. 이때 기질부와 균열부에서의 수포화도는 각각 0.95와 0.7의 값을 보였다. 즉, 기질부의 모세관압이 3.5-5 kPa 사이임을 알 수 있다. P_c 값이 12 kPa일 때 기질부와 균열부의 수포화도는 각각 0.55와 0.4의 값을 보여주었으며, 균열부에서 더 많은 물이 CO₂에 의해 대체되었음을 알 수 있다. 균열매질에서의 기질부의 경우 균질매질에 비해 더 높은 모세관압을 보여주는데, 이는 균열매질의 경우 균열부가 유체의 주된 유동경로이므로 CO₂가 기질부로 침투하기 위해서는 더 높은 압력을 필요로 함을 의미한다.

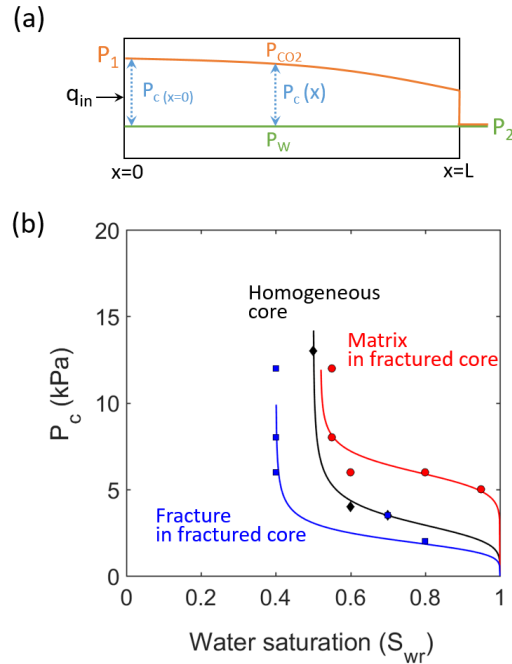


Fig. 4. (a) A schematic showing the pressure profiles within the core (Figures modified from Pini et al. (2012)). (b) Capillary pressure curves plotted against brine saturation for both the homogeneous and fractured core (Oh et al. (2013)).

포획메커니즘 평가

CO₂ 지중저장은 구조포획, 잔류포획, 용해포획, 광물포획 등 다양한 포획 메커니즘으로 이루어진다(IPCC, 2005). 코어 규모에서 포획메커니즘을 평가하기 위해 흡수팽윤 시험(imbibition test)을 수행하였다. 시료는 불균질매질 시료를 사용하였으며, CO₂ 주입이 완료된 후 q_w=0.05 mL/min의 주입율로 물을 주입하였다.

Fig. 5는 흡수팽윤 시험 결과를 이용해 코어의 수직방향으로 평균한 CO₂ 포화도를 PV에 따라 도시한 그림이다. 주입율이 q_w=0.05 mL/min인 경우, 코어 상단을 통해 주입된 염수는 공극내에 존재하던 CO₂를 밀어내며 동시에 일부 용해시켰다. 이 기간동안 CO₂ 포화도의 감소가 가장 컸던 지점은 샌드층(zone A)으로써, CO₂ 포화도가 0.4에서 0.25로 감소하였다. 반면 실트층(zone B)에서는 CO₂ 포화도가 0.28에서 0.22로 감소하였다. 즉, 자유상(free-phase) CO₂는 낮은 P_c 매질에서 쉽게 이동되어지는 반면, 높은 P_c 매질에서는 적은 양의 CO₂가 이동되어짐을 알 수 있다.

실험결과를 통해 시간에 따른 코어내 CO₂ 양(mass)의 변화를 살펴보고 포획메커니즘을 평가하였다(Fig. 5). 코어내의 CO₂ 양은 다음식에 의해 계산되어졌다.

$$M = V \cdot \rho \cdot \sum_n \varphi_n \cdot S_{g,n} \tag{2}$$

위 식에서 V는 코어의 각 요소부피, ρ는 유체의 밀도, φ는 매질의 공극률, S_{g,n}은 n번째 요소에서의 CO₂ 포화도이다. X-선 스캐너의 각 픽셀 사이즈는 0.4 × 0.4 mm이고, 실험조건인 P=10 MPa, T=40°C에서 CO₂의 밀도는 0.629 g/cm³이다 (Span and Wagner, 1996).

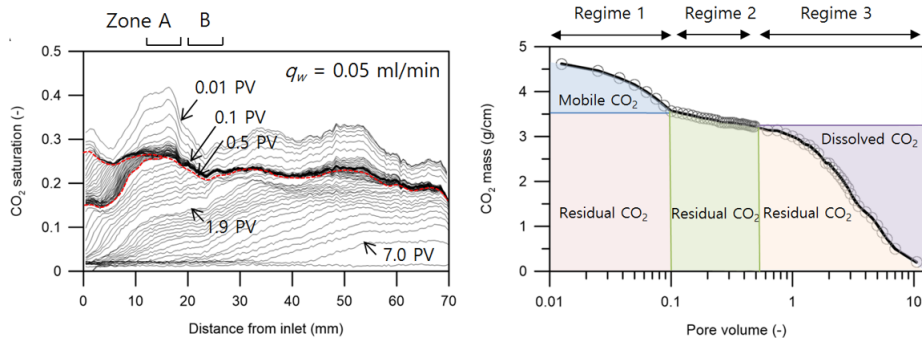


Fig. 5. Vertically-averaged CO₂ saturation profile during the imbibition tests with fresh brine and the temporal variation of CO₂ mass in the core (Oh et al. 2017).

PV에 따른 CO₂ 양을 도시하면 3개의 영역으로 구분할 수 있다. 영역 1에서는 염수 주입에 따른 자유상 CO₂가 이동하면서 CO₂ 양이 4.7 g/cm에서 3.5 g/cm로 감소한다. 영역 2에서는 비교적 일정한 CO₂ 양을 유지하는데, 이는 모세관압에 의한 CO₂의 잔류포획을 의미한다. 그리고 영역 3에서는 계속된 염수의 주입에 의한 CO₂의 용해(용해포획)을 보여주고 있다.

결론

이미징 기술은 매질 자체의 구조특성 뿐만 아니라 유체의 유동특성을 분석하기 위해 공극규모, 코어규모, 그리고 중급 규모에서 다양하게 활용되고 있다. 본 기술보고에서는 코어규모에서 유동실험과 이미징기술을 연계하여 균질매질, 균열 매질, 그리고 불균질매질에서의 CO₂ 유동 특성과 함께 CO₂ 주입시 주입관경 주변에서 발생할 수 있는 염침전 현상, 균질매 질과 균열매질에서의 모세관압 평가, 그리고 CO₂ 주입이 완료된 이후(post-injection period) 나타나는 포획메커니즘 평가 등에 대해 살펴보았다. 이미징기술을 통해 코어내에서 시간에 따른 CO₂ 플룸을 이미지화 함으로써 유동특성을 분석할 수 있었으며, 특히 균열이 포함된 매질과 불균질한 매질에서의 유동 및 저장특성을 평가할 수 있다.

이미징 기술의 지속적인 발전으로 매질내에서의 물리, 화학적 프로세스를 이해하는 등 많은 성과가 있었지만 한계점도 존재한다. 고해상도로 갈수록 정밀한 분석이 가능한 반면 관측할 수 있는 범위가 작아지므로 불균질성을 이해하는데 제한점이 있다. 즉, 시료크기와 이미징해상도에는 트레이드오프(trade-off) 관계가 있으며, 따라서 다양한 규모(~μm, ~cm, ~m)에서 분석된 결과들을 연계하는 연구가 요구된다.

마지막으로, CO₂ 지중저장과 관련해서는 온도(T), 유체유동(H), 역학적 안정성(M), 화학적반응(C), 생물학적활동(B) 등이 연동하는 복잡한 프로세스를 이해해야 하는데, 실내실험의 경우 한 두가지 요소를 고려하여 진행된 바는 있지만 THMCB를 모두 고려한 실험연구는 없으며, 향후 이러한 분야에서 지속적인 연구가 진행되기를 기대한다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업(18-3421)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No.2015851000010)을 받아 수행되었습니다.

References

- Agartan, E., Trevisan, L., Cihan, A., Birkholzer, J., Zhou, Q., Illangasekare, T.H., 2015, Experimental study on effects of geologic heterogeneity in enhancing dissolution trapping of supercritical CO₂, *Water Resources Research*, 51, 1635 – 1648.
- Akbarabadi, M., Piri, M., 2013, Relative permeability hysteresis and permanent capillary trapping characteristics of supercritical CO₂/brine systems: an experimental study at reservoir conditions, *Advances in Water Resources*, 52, 190-206.
- Armstrong, R., Porter, M., Wildenschild, D., 2012, Linking pore-scale interfacial curvature to column scale capillary pressure, *Advances in Water Resources*, 46, 55-62.
- Bachu, S. and Bennion, B., 2008, Effects of in-situ conditions on relative permeability characteristics of CO₂-brine systems, *Environmental Geology*, 54, 1707-1722.
- Baumann, G., Henniges, J., De Lucia, M., 2014, Monitoring of saturation changes and salt precipitation during CO₂ injection using pulsed neutron-gamma logging at the Ketzin pilot site, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, 134-146.
- Berg, S., Ott, H., Klapp, S.A., Schwing, A., Neiteler, R., Brussee, N., Makurat, A., Leu, L., Enzmann, F., Schwarz, J.-O., Kersten, M., Irvine, S., Stampanoni, M., 2013, Real-time 3-D imaging of Haines jumps in porous media flow, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 3755-3759.
- Blunt, M.J., Bijeljic, B., Dong, H., Gharbi, O., Iglauer, S., Mostaghimi, P., Paluszny, A., Pentland, C., 2013, Pore-scale imaging and modelling, *Advances in Water Resources*, 51, 197-216.
- Cnudde, V. and Boone, M.N., 2013, High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications, *Earth-Science Reviews*, 123, 1-17.
- Coles, M., Hazlett, R., Spanne, P., Soll, W., Muegge, E., Jones, K., 1998, Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 19, 55-63.
- Flannery, B., Deckman, H., Roberge, W., D'Amico, K., 1987, Three-dimensional X-ray microtomography, *Science*, 237, 1439-1444.
- Giorgis, T., Carpita, M., Battistelli, A., 2007, Modeling of salt precipitation during the injection of dry CO₂ in a depleted gas reservoir, *Energy Conversion and Management*, 48, 1816-1826.
- Gouze, P., Luquot, L., 2011, X-ray microtomography characterization of porosity, permeability and reactive surface changes during dissolution, *Journal of Contaminant Hydrology*, 120-121, 45-55.
- Grude, S., Landro, M., Dvorkin, J., 2014, Pressure effects caused by CO₂ injection in the Tubaen Fm., the Snohvit field, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 178-187.
- Hingerl, F.F., Yang, F., Pini, R., Xiao, X., Toney, M.F., Liu, Y., Benson, S.M., 2016, Characterization of heterogeneity in the Heletz sandstone from core to pore scale and quantification of its impact on multi-phase flow, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 48, 69-83.
- Iglauer, S., Paluszny A., Pentland, C.H., Blunt, M.J., 2011, Residual CO₂ imaged with X-ray micro-tomography. *Geophysical Research Letters*, 38, L21403.
- IPCC, 2005, Special report on carbon dioxide capture and storage. In: Metz B. et al., editors, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim, K.-Y., Han, W.S., Oh, J., Kim, T., Kim, J.-C., 2012, Characteristics of salt-precipitation and the associated pressure build-up during CO₂ storage in saline aquifer, *Transport in Porous Media*, 92, 397-418.
- Krause, M., Perrine, J.-C. and Benson, S., 2011, Modeling permeability distributions in a sandstone core for history matching coreflood experiments, *SPE Journal*, 16, 768-777.

- Krevor, S.C., Pini, R., Li, B., Benson, S.M., 2011, Capillary heterogeneity trapping of CO₂ in a sandstone rock at reservoir conditions, *Geophysical Research Letter*, 38, L15401.
- Krevor, S.C., Pini, R., Zuo, L., Benson, S.M., 2012, Relative permeability and trapping of CO₂ and water in sandstone rocks at reservoir conditions, *Water Resources Research*, 48, W02532.
- Krevor, S.C., Blunt, M., Benson, S.M., Pentland, C.H., Reynolds, C., Al-Menhali, A., Niu, B., 2015, Capillary trapping for geologic carbon dioxide storage – From pore scale physics to field scale implications, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40, 221-237.
- Li, B., Benson, S.M., 2015, Influence of small-scale heterogeneity on upward CO₂ plume migration in storage aquifers, *Advances in Water Resources*, 83, 389-404.
- Manceau, J.C., Ma, J., Li, R., Audigane, P., Jiang, P.X., Xu, R.N., Tremosa, J., Lerouge, C., 2015, Two-phase flow properties of a sandstone rock for the CO₂/water system: Core-flooding experiments, and focus on impacts of mineralogical changes, *Water Resources Research*, 51, 2885-2900.
- Menke, H.P., Andrew, M.G., Blunt, M.J., Bijeljic, B., 2016, Reservoir condition imaging of reactive transport in heterogeneous carbonates using fast synchrotron tomography-Effect of initial pore structure and flow conditions, *Chemical Geology*, 428, 15-26.
- Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S., Aiken, T., 2010, Geological storage of CO₂ in saline aquifers – a review of the experience from existing storage operations, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 659-667.
- Miri R., Hellevang, H., 2016. Salt precipitation during CO₂ storage - A review, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 51, 136-147.
- Mitchell, J., Chandrasekera, T.C., Holland, D.J., Gladden, L.F. and Fordham, E.J., 2013, Magnetic resonance imaging in laboratory petrophysical core analysis, *Physics Reports*, 526, 165-225.
- Oh, J., Kim, K.-Y., Han, W.S., Kim, T., Kim, J.-C., Park, E., 2013, Experimental and numerical study on supercritical CO₂/brine transport in a fractured rock: Implications of mass transfer, capillary pressure and storage capacity, *Advances in Water Resources*, 62, 442-453.
- Oh, J., Kim, K.-Y., Han, W.S., Park, E., Kim, J.-C., 2015, Migration behavior of supercritical and liquid CO₂ in a stratified system: Experiments and numerical simulations, *Water Resources Research*, 51, 7937-7958.
- Oh, J., Kim, K.-Y., Han, W.S., Park, E., 2017, Transport of CO₂ in heterogeneous porous media: Spatio-temporal variation of trapping mechanisms, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 57, 52-62.
- Pentland, C.H., El-Maghraby, R., Iglauer, S., Blunt, M.J., 2011, Measurement of the capillary trapping of super-critical carbon dioxide in Berea sandstone, *Geophysical Research Letter*, 38, L06401.
- Pini, R., Krevor, S.C.M., Benson, S.M., 2012, Capillary pressure and heterogeneity for the CO₂/water system in sandstone rocks at reservoir conditions. *Advances in Water Resources*, 38, 48-59.
- Pini, R., Benson, S.M., 2013, Characterization and scaling of mesoscale heterogeneities in sandstones. *Geophysical Research Letters*, 40, 3903-3908.
- Prather, C.A., Bray, J.M., Seymour, J.D., Codd, S.L., 2016, NMR study comparing capillary trapping in Berea sandstone of air, carbon dioxide, and supercritical carbon dioxide after imbibition of water, *Water Resources Research*, 52, 713-724.
- Pruess, K., Müller, N., 2009, Formation dry-out from CO₂ injection into saline aquifers: 1. Effects of solids precipitation and their mitigation. *Water Resources Research*, 45, W03402.
- Span, R., Wagner, W., 1996, A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100K at pressures up to 800 MPa, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25, 1509-1596.
- Trevisan, L., Pini, R., Cihan, A., Birkholzer, J.T., Zhou, Q., Gonzalez-Nicolas, A., Illangasekare, T.H., 2017, Imaging and quantification of spreading and trapping of carbon dioxide in saline aquifers using meter-scale laboratory

experiments. *Water Resources Research*, 53, 485-502.

Valvatne, P., Blunt, M., 2004, Predictive pore-scale modeling of two-phase flow in mixed wet media. *Water Resources Research*, 40, W07406.

Wildenschild, D., Hopmans, J.W., Vaz, C.M.P., Rivers, M.L., Rikard, D., Christensen, B.S.B., 2002, Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolution, and limitations. *Journal of Hydrology*, 267, 285-297.

Wildenschild, D., Sheppard, A.P., 2013, X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems. *Advances in Water Resources*, 51, 217-246.