

이산화탄소 지중저장 평가를 위한 실내실험 연구동향

오준호 · 김구영* · 김태희 · 김정찬

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

A Review of Laboratory Experiments for CO₂ Geological Storage

Jun-Ho Oh, Kue-Young Kim*, Taehee Kim and Jeong-Chan Kim

Geologic Environmental Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

1. 서 언

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 4차 종합평가보고서에 의하면 지구온난화는 지구 평균기온과 해수면 상승 등의 관측자료를 통해 명백히 나타나고 있으며, 인간 활동으로 인한 온실가스 배출량이 1970년부터 2004년 사이에 70% 가량 증가했다. 또한 온실가스 배출시나리오에 따르면 화석연료 의존적인 기존의 발전 시나리오가 지속될 경우 21세기 말에는 기온이 최대 6.4°C 상승하고 해수면이 최대 59 cm 상승할 것으로 전망하였다. 이 보고서는 심각한 기후변화에 대처하기 위해 적극적인 온실가스 감축과 더불어 기후변화에 대한 적응이 필요함을 제안하고 있다(IPCC, 2007).

우리정부도 2020년 국가 온실가스 감축 목표치를 BAU(Business As Usual, 기존정책을 유지할 때 예상되는 배출 전망치) 대비 30%로 확정하였으며, 이러한 감축목표를 실현하기 위해 주요 감축수단으로 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage; CCS) 기술의 도입강화를 제시하고 있다(MKE, 2009).

CCS는 화력발전소 등 대규모 이산화탄소 배출원에서 포집된 이산화탄소를 가압하고 액체상태로 수송하여 지하 심부에 저장 및 관리하는 기술이다. 이산화탄소 지중저장을 위해 고려되는 대상은 심부염수층(saline aquifers), 폐유전이나 가스전(oil and gas reservoirs), 그리고 난채굴성 석탄층(unminable coal seams) 등이며, 특히 심부염수층의 경우 CO₂ 지중저장 용량은 세계적으로 10,000 GtCO₂일 것으로 추정되고 있다

(Krause *et al.*, 2009).

이산화탄소의 지중저장 실증을 위해서는 저장소 특성화 단계(site characterization), 타당성 검증단계(validation), 상용화단계(deployment)가 요구되며, 이를 위해 저장소의 처분능력(storage capacity) 평가, 이산화탄소의 주입효율(injectivity) 증진, 이산화탄소의 거동특성(mobility) 평가, 지화학적 반응(chemical reaction) 및 안정성(stability) 평가, 덮개암의 특성(cap-rock properties) 평가, 모니터링 기술(monitring, mitigation, verification; MMV) 등 핵심 요소기술 개발이 함께 진행되어야 한다. 이중 이산화탄소의 주입정/관측정 설계와 설치에 관련하여서는 Kim *et al.*(2009)이 CO₂ 주입정의 확정/설치, 주입/관측내 폐매물체 특성, 주입정 운영방법에 관한 연구동향을 발표한 바 있다. Chae *et al.*(2005)은 이산화탄소의 지중처분 기술 중 대수층처분 및 탄산염광물화(carbon mineralization) 처분기술의 지구화학적 개념과 기술개발 동향에 대해 검토하였다.

이산화탄소를 지중에 주입하는데 있어 공극률(porosity), 고유투과계수(absolute permeability), 상대투과율(relative permeability), 이산화탄소-염수암석 시스템(CO₂-brine-rock system)에서의 모세관압(capillary pressure)에 대한 정보는 매우 중요하다(Cinar *et al.*, 2009). 이들 인자들은 지중에서 저장량 평가, CO₂ 거동분포를 포함해 효율적인 주입을 위한 관정의 개수를 결정하는데 필수적이다. 따라서 심부 지중환경에서 매질 및 다상유체 특성화 파라미터를 산정하고 이산화탄소의 유동특성을 이해하기 위해서는 현장실험과 함께 이를 보완할 수 있는 실내실험이 요구된다. 실내실험

*Corresponding author: kykim@kigam.re.kr

과 관련하여 선진외국에서는 코어규모에서 이산화탄소의 포획기작(trapping mechanism) 및 거동특성 분석을 위해 코어유동실험(coreflood test)을 수행하고 있으며, 온도, 압력, 주입을 등 실험조건에 따른 거동특성 분석 연구가 이루어지고 있다(Izgec *et al.*, 2008; Bachu and Bennion, 2008; Agbalaka *et al.*, 2009; Perrin *et al.*, 2009; Perrin and Benson, 2010; Harpalani and Mitra, 2010).

국내의 경우 이산화탄소의 지중저장과 관련된 연구는 대부분 모델링 연구(Sung *et al.*, 1993; Son *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2009)에 집중되어 있으며, 수치모델에서 필요로 하는 입력자료 대부분이 문헌에 기반한 가정치를 사용하고 있다. 국내에서 이산화탄소 지중저장 특성화를 위한 실내실험은 많지 않으며, 다만 석유개발 분야에서 다상유체 유동 연구를 위해 가스-오일, 물-오일 시스템에 관한 연구가 수행된 바 있다(Lee *et al.*, 1996). 최근 Wang *et al.*(2010)이 탱크모델에서 전기비저항을 이용해 다양한 상(phase)의 이산화탄소가 거동하는 특성을 분석한 바 있으나, 현재 선진외국에 비해 국내에서는 이산화탄소 지중저장과 관련한 실내실험이 초기단계이기에 국외에서의 연구동향을 살펴봄으로써 앞으로 우리의 연구방향을 설정할 필요가 있다. 이에 본 해설에서는 이산화탄소 지중저장을 위한 기초 연구의 일환으로 주요 파라미터의 특성 및 평가방법을 소개하고, 특히 코어규모의 실내 실험 연구사례 소개를 통해 다상유체의 유동특성을 분석하기 위한 실험방법과 연구동향에 대해 살펴보고자 한다.

2. 실내실험 목적

지중환경에서 이산화탄소의 거동특성을 이해하기 위해서는 매질의 특성과 함께 유체의 물리적, 화학적 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이를 위해 현장에서 물리탐사, 공내검층(well logging), 관정시험(well test) 등을 수행한다. 그러나 현장에서 획득하는 자료의 경우 간접적인 방법을 이용하거나 혹은 측정되어지는 값이 불확실성을 내포할 수 있다. 예를 들어 관정시험을 통해 얻어지는 투과계수는 관정 주변의 스킨효과(skin effect) 등에 의해 과소평가되거나 균열 등에 의해 과대평가되는 등의 한계점을 가지며, 이러한 불확실한 값을 보완하기 위해 실내실험이 이루어진다.

일반적인 코어분석(routine core analysis)의 경우 코

어의 공극률, 입자의 밀도, 가스투과계수, 물의 포화도 등 기본적인 특성을 제공한다. 이들 자료는 실험실 환경의 온도, 압력 조건에서 건조된 코어를 대상으로 가스를 활용해 공극률과 투과계수를 측정하기 때문에 실제 지중저장환경에서의 특성과는 차이가 발생한다. 일반적인 코어분석의 절차 및 측정항목은 Fig. 1a와 같다. 반면 특정코어분석(special core analysis)은 일반코어 분석과는 달리 지중저장 환경을 재현하고 저장환경의 온도, 압력 조건에서 필요한 자료를 얻음으로써 실제 관점에서 획득한 자료를 보완한다. 특정코어분석의 경우 코어에서의 유체의 분포도, 전기특성, 다상유체(2상 혹은 3상)의 유동특성 등을 분석하게 된다(Fig. 1b).

이산화탄소 지중저장을 위해서는 공극률, 고유투과계수 등과 같이 저장될 지질 매체가 갖고 있는 기본 물성과 상대투과율이나 모세관압과 같이 CO₂ 주입으로 인해 달라지는 물성변화에 대한 기초연구가 선행되어야 한다. CO₂ 주입으로 인한 상대투과율 변화와 매질의 응력변화는 실제주입 상황을 고려한 연구가 수행되어야 하며, 이에 현장조건(염수의 농도, 코어 내부의 온도, 이산화탄소 주입 압력 및 온도 등)을 고려한 코어 유동실험을 통해 이루어진다. 코어유동실험은 코어를 밀폐용기 안에 넣고 염수와 이산화탄소를 코어 단면에 주입하면서 양 종단면에서의 유량 및 압력 변화를 측정하여 온도, 압력, 염수농도, 이산화탄소의 주입상태 등의 조건에 의해 코어의 유체유동 특성을 측정하는 실험이다.

이외에 이산화탄소 주입시 대상 매질에 미치는 응력평가를 위한 실험도 수행된다. 유체의 지속적인 주입은 매질에 존재하는 균열과 조직에 영향을 미쳐 균열을 발달시키거나 축소시키며 공극에 작용하는 압력에 변화를 가져오게 한다. 이러한 현상은 이산화탄소의 지중저장 시 매질의 팽창현상(swelling effect)을 일으키거나 주입율에 영향을 준다(Harpalani and Mitra, 2010). 이산화탄소의 주입으로 인한 매질의 응력변화에 대한 연구는 코어유동실험과 유사하며 단지 다상유체의 주입으로 인해 코어 내·외부에 발생하는 압력변화나 코어 길이변화를 측정할 수 있는 장치가 있다는 차이가 있다. 이러한 실험은 코어에 다상의 유체를 주입하고 이로 인해 코어 내·외부에 발생하는 응력변화를 압력게이지를 통해 측정하여 유량 및 주입 압력에 따른 응력변화를 관찰한다. 또한 변위센서(Linear Variable Displacement Transformer; LVDT)를 통해 다상유체의 주입실험 동안 코어의 길이에 대한 변화를 지속적으로 측정한다(Shi *et al.*, 2006). 이런 응력변화

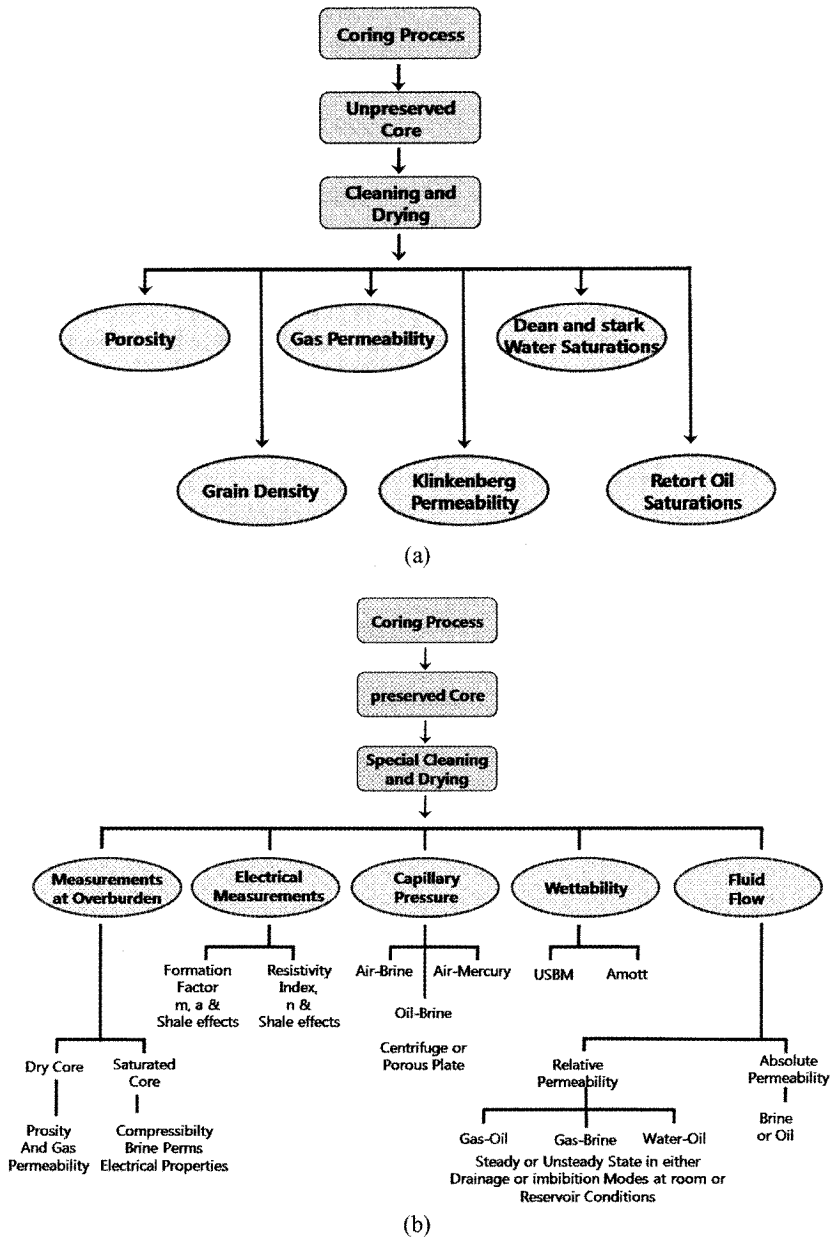


Fig. 1. A schematic diagram of core analysis; (a) Routine core analysis, (b) special core analysis.

실험을 통해 이산화탄소 지중저장 시 매질의 팽창현상을 최소화하고 적절한 주입율을 산정할 수 있다. 본 절에서는 코어내에서의 유체유동 특성과 관련한 실험 항목 및 실험방법에 대하여 기술하고자 한다.

2.1. 공극률

이산화탄소를 지중에 저장하기 위해서는 먼저 주입

대수층의 저장용량(storage capacity)을 평가하여야 한다. 이러한 이산화탄소 저장용량 평가와 관련하여 많은 연구가 진행중이며 다양한 방법들이 제안되어졌다 (Doughty *et al.*, 2001; Bradshaw *et al.*, 2007; Bachu *et al.*, 2007; Kopp *et al.*, 2009; Kopp *et al.*, 2009). 이산화탄소의 지중저장용량 평가와 관련하여 Bachu *et al.*(2007)은 ‘Resource-Reserve Pyramid’ 개념을 제안

하였다. 이 개념에 의하면 이산화탄소의 지중저장을 위해 시간규모, 공간규모, 평가방법, 저장옵션 등에 따라 다양한 관점을 고려하지는 것이다. 기술-경제적(techno-economic) ‘Resource-Reserve Pyramid’ 에 의하면 저장용량 평가를 위한 피라미드는 4개의 단계로 구성되어 있으며, 가장 하부로부터, 이론적 저장용량(theoretical capacity), 유효용량(effective capacity), 가용용량(practical capacity), 그리고 가장 상부에 위치한 부합용량(matched capacity)이 있다. 이중 이론적 저장용량은 잔류액체포화도(irreducible liquid saturation)를 제외한 공극의 부피이며, 다음 식과 같이 표현된다.

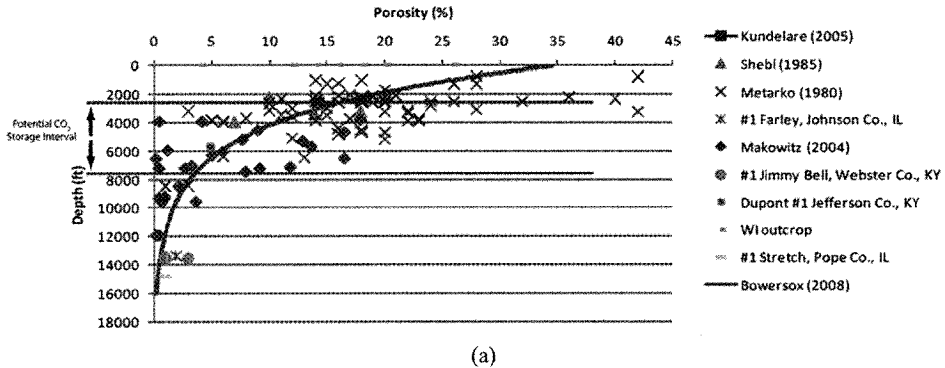
$$V = \iiint \phi (1 - S_{l,r}) dx dy dz \quad (1)$$

위 식에서 ϕ 는 공극률, $S_{l,r}$ 은 해당 유체의 잔류포화도이다.

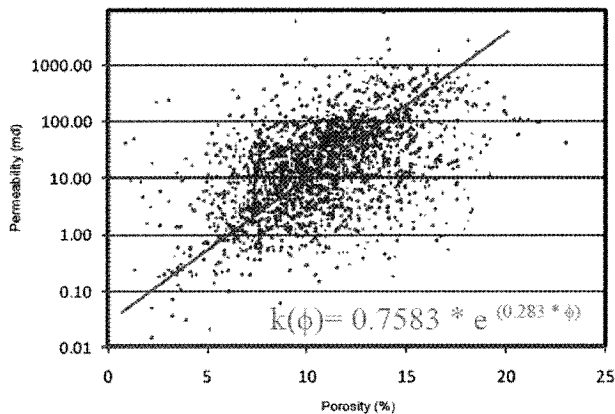
이산화탄소의 저장용량을 광역적으로 초기 평가하는

데 있어 공극률은 가장 중요한 파라미터중 하나이며, 일반적으로 심도가 깊어짐에 따라 그 값이 감소하는 경향을 보인다. Medina *et al.*(2008)에 의하면 미국 일리노이즈 분지의 사암을 이용하여 심도에 따른 공극률의 변화를 분석하였으며 이를 지수식(exponential equation)으로 표현하였다. 이산화탄소를 저장할 수 있는 심도범위를 살펴보면 공극률은 약 5-20%의 범위를 보인다(Fig. 2a).

공극률을 측정하는 방법으로는 직접측정법(direct measurement), 침윤법(imbibition method), 수은주입법(mercury injection), 가스팽창법(gas expansion), 밀도법(density method), 기재암석법(petrographic method) 및 기타 방법이 있다. 최근에는 컴퓨터 단층촬영(CT scanner)을 이용하거나 핵자기공명분광법(Nuclear Magnetic Resonance; NMR) 기술을 이용하여 공극률을 산정하기도 한다(Bye *et al.*, 2008).



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Porosity-depth relationship from 828 samples of Mount Simon sandstone in the Illinois Basin. (b) k vs. ϕ for the MRCSP region (Medina *et al.*, 2008).

2.2. 투과계수

이산화탄소를 지중에 경제적이고 효율적으로 주입하기 위해서는 높은 주입도(injectivity)를 요구하며, 주입도는 일반적으로 투과계수(permeability, k)와 주입대상층의 두께(h)의 곱($k \times h$)으로 표현된다(Burton *et al.*, 2009). 투과계수는 주어진 압력구배하에서 유체가 얼마만큼 잘 통과할 수 있는지를 보여주는 매질의 특성이며, 공극률과의 상관성 분석을 통해 저류지 특성화를 효과적으로 할 수 있다(Beaumont and Foster, 1999 eds.). Medina *et al.*(2008)은 Mount Simon 사암을 대상으로 공극률과 투과계수의 상관관계를 분석하기도 하였다(Fig. 2b).

투과계수를 측정하는 방법으로는 정류상태 가스투과시험, 부정류상태 가스투과시험, 정류상태 액체투과시험법이 있다. 일반적인 투과계수 측정은 코어홀더에 코어를 설치한 후 한쪽 끝에 질소를 이용해 가압하고 유속(flow rate)과 압력차(pressure differential)를 측정하는 방법이다. 정류상태 가스투과계수 측정의 경우 4-5개의 압력조건별(P_m)로 투과계수를 측정하여 gas slippage (Klinkenberg effect)에 대한 보정을 고려할 수 있다. 즉, 투과계수와 $1/P_m$ 의 관계를 도시하고, 압력(P_m)이 무한대일때의 투과계수는 액체에 대한 투과계수(k_L)가 된다.

부정류상태 가스투과계수 측정법은 초기 암석시료에 고압의 가스를 주입하고 시간에 따라 코어를 통해 유출되는 가스로 인해 서서히 감소되는 압력을 측정하는 방법이다. 표준방법은 아니지만 투과계수가 매우 낮은 암석시료의 투과계수를 측정할 수 있는 장점이 있다. 즉, 이산화탄소 지중저장시 요구되는 덮개암(cap rock)의 매질특성을 평가할 때 사용할 수 있는 방법이다. 세 번째로 정류상태 액체투과계수 측정법은 유체(oil 혹은 염수)로 100% 포화된 상태에서의 투과계수를 측정할 수 있으며, 공극내에 유체가 잔류포화 되어있는 상태에서 값을 측정할 수 있다.

2.3. 모세관압

모세관압(capillary pressure) 역시 이산화탄소 지중저장에 있어 중요한 파라미터 중 하나이다. 모세관압은 두께 혹은 그 이상의 혼합되지 않는 유체가 하나의 시스템에 존재할 때 이들 유체 사이의 계면장력(interfacial tension)에 의해 발생한다. 지중에 이산화탄소를 주입하고자 할때 모세관압이 크면 더 큰 주입압력을 필요로 하게 된다(Alkan *et al.*, 2010). 또한 모세관압에 의한 포획기작은 용해포획(solution trapping)

과 함께 염수층에서의 CO₂ 저장에 있어 주요한 물리적 기작중 하나이다(Chang *et al.*, 1998; Kumar *et al.*, 2005; Ulker *et al.*, 2007; Ulker, 2009). 일부 실험결과에 의하면 모세관압은 CO₂-염수-암석 시스템에서 계면장력과 습윤성(wettability)에 의해 영향을 받는다(Chiquet *et al.*, 2005; Plug and Bruning, 2007; Bennion and Bachu, 2008). Plug and Bruning(2007)는 압력이 증가함에 따라 계면장력이 감소한다고 보고하였다.

모세관압을 측정하는 방법으로는 크게 동적인 방법(dynamic method)과 정적인 방법(static method)이 있다. 동적인 방법은 원심분리기(centrifuge)를 이용하여 유체로 포화된 암석시료에 큰 증력을 가하는 방법이다(Hassler and Brunner, 1945). 이 방법은 원심분리기가 작동되는동안 암석시료로부터 유체가 얼마나 빠져나가는가를 측정하게 된다. 정적인 방법으로는 수은주입법(mercury intrusion)이 있다(Hassler and Brunner, 1945; Purcell, 1949). 수은주입법은 모세관압을 측정하는 가장 직접적인 방법이다. 건조된 암석시료를 샘플 홀더에 장착하고 매우 낮은 압력을 유지한 상태에서 수은을 암석시료주위에 둘러싸게 한다. 수은의 압력을 점차 증가시키며 암석내로 얼마만큼의 수은이 주입되는지를 측정하는 방법이다.

2.4. 상대투과율

이산화탄소를 심부염수층에 주입하게 되면 지층 매질에는 초임계상(supercritical phase)의 이산화탄소와 액체상의 염수가 공존하게 된다. 이때 서로 다른 상을 가진 두 유체가 매질에서 투과되는 정도는 상대투과율에 의해 결정된다. 매질내에서 다상 유체 유동의 경우 특정 상(phase)의 상대투과율(k_{ri})은 그 상의 유효투과율(k_i)과 절대투과율(k)의 비율($k_{ri} = k_i/k$)로서 정의된다. 상대투과율은 모세관압과 함께 유체의 포화도에 따른 함수로서 염수와 이산화탄소의 거동특성을 제어한다. Fig. 3은 drainage 환경과 imbibition 환경에서의 모세관압과 상대투과율 함수를 나타낸 그림이다. 이산화탄소가 주입되는 기간동안은 drainage 환경이 지배적이며, $S_{gr}^a = 0$ 이 되어 잔류포획기작은 없다. 하지만 주입이 끝난 후 CO₂ 플룸(plume)의 경계부분은 imbibition 환경하에 놓이며, $S_{gr}^a > 0$ 이 되어 이산화탄소가 잔류포획기작에 의해 포획된다. Burton *et al.*,(2009)는 이산화탄소의 주입효율과 관련된 주입도 평가에 있어 상대투과율의 중요성에 대해 강조한 바 있다.

상대투과율 측정방법은 유체의 유동상태에 따라 비

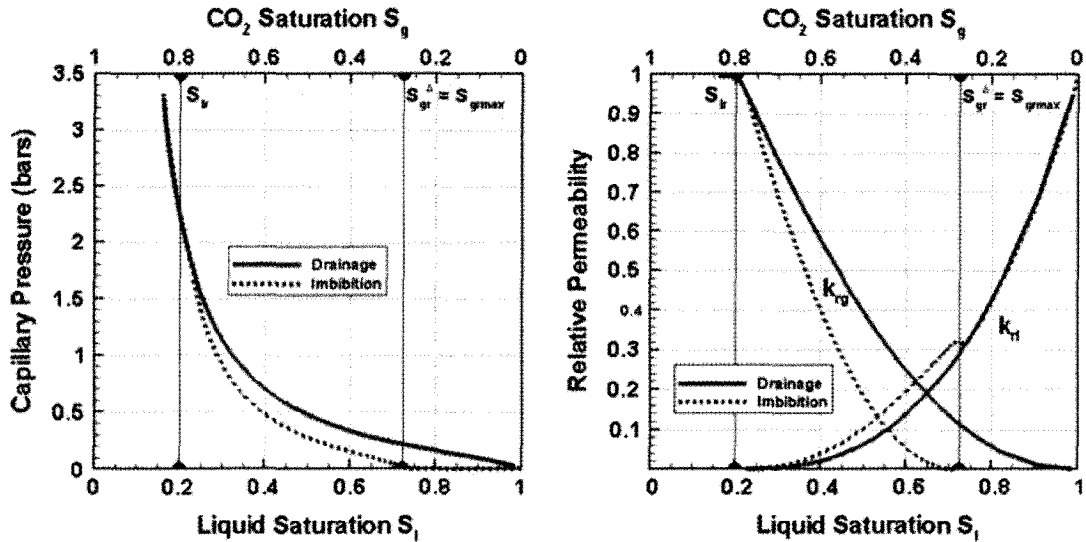


Fig. 3. Capillary pressure and relative permeabilities as a function of saturation for primary drainage and for imbibition when $S_{gr}^* = S_{grmax}$. Smaller values of S_{gr}^* would produce curves within the envelope formed by these two curves. The curve labeled k_{rg} shows relative permeability for supercritical CO_2 and the curve labeled k_{rl} shows relative permeability for brine (Doughty, 2010).

정상유동법(unsteady-state test)과 정상유동법(steady-state test)으로 나뉜다. 비정상유동법은 우선 건조된 코어에 이산화탄소를 주입해 코어가 이산화탄소로 포화되도록 한다. 코어가 이산화탄소로 완전히 포화되면 일정한 온도와 압력조건에서 염수를 일정유량으로 주입하면서 시간에 따라 배출되는 염수와 이산화탄소의 양을 측정하여 상대투과율을 계산해 낸다. 상대투과율 계산에 있어 비정상유동방법은 시간에 따른 유출량을 정확히 측정해야 하지만 이산화탄소의 경우 온도와 압력에 따라 상변화가 민감하게 나타나기 때문에 유출되는 양을 시간에 따라 정량적으로 측정하는데 어려움이 있다. 따라서 일부 연구에서는 비정상유동의 실험에서 이산화탄소의 상변화를 가져오지 않도록 임계점을 충분히 초과하는 온도와 압력 조건에서 주입하고 온도를 일정하게 유지하기 위해 열선(heat coil)을 사용하거나 오븐내에 실험시스템을 구축하여 실험을 수행하였다(Perrin *et al.*, 2009; Mitchell *et al.*, 2009).

정상유동법은 비교적 정확성이 인정되는 방법으로 비정상유동법과 실험준비단계는 동일하며, 다만 유체주입시 염수와 이산화탄소를 일정 유속으로 동시에 주입하는 차이가 있다. 정상유동법은 이처럼 다상의 유체를 동시에 주입하여 평형이 될 때까지 기다린 후 포화도, 코어 양끝의 압력차, 유속(또는 압력)을 구하여 Darcy's law에 대입하여 그 값을 구하고, 유속(또는 압

력)을 변화시키면서 포화도 범위를 변화시킨다. 정상유동법에 의한 상대투과율 측정에서 가장 어려운 문제 중의 하나는 포화도(saturation) 산정이다. 포화도를 산정하는 방법에는 무게를 측정하는 법, 물질 수지법 등이 있는데, 이들 모두는 측정에 있어서 증발 등에 의한 오차가능성이 매우 높은 편이다. 따라서 코어유동 실험에 관한 최근 연구들에서는 X-ray 촬영(X-ray scanner), 컴퓨터단층촬영(Computed Tomography, CT), 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging, MRI)과 같은 관측장비를 이용해 포화도를 측정하고 있다. 이들 관측장비에 대해서는 다음절에 소개하도록 하겠다.

3. 실험측정 장치

코어유동실험 구성장치는 크게 주입시스템(injection system), 코어셀(coreflood cell), 생산시스템(production system), 데이터 기록 시스템(logging system)으로 나눌 수 있다(Fig. 4). 먼저 주입시스템은 저장소에서 나온 유체(CO_2 , 염수)를 시린지펌프(syringe pump)를 사용하여 압력을 생성시키고 후방압력조절기(back-pressure regulator)를 이용하여 코어셀 주입부와 배출부의 압력계(pressure transducer)를 확인하여 주입압력을 조절하는 장치이다. 코어셀은 일반적인 경우 고온과 고압에 안정적인 알루미늄 코어셀을 사용하며, 자

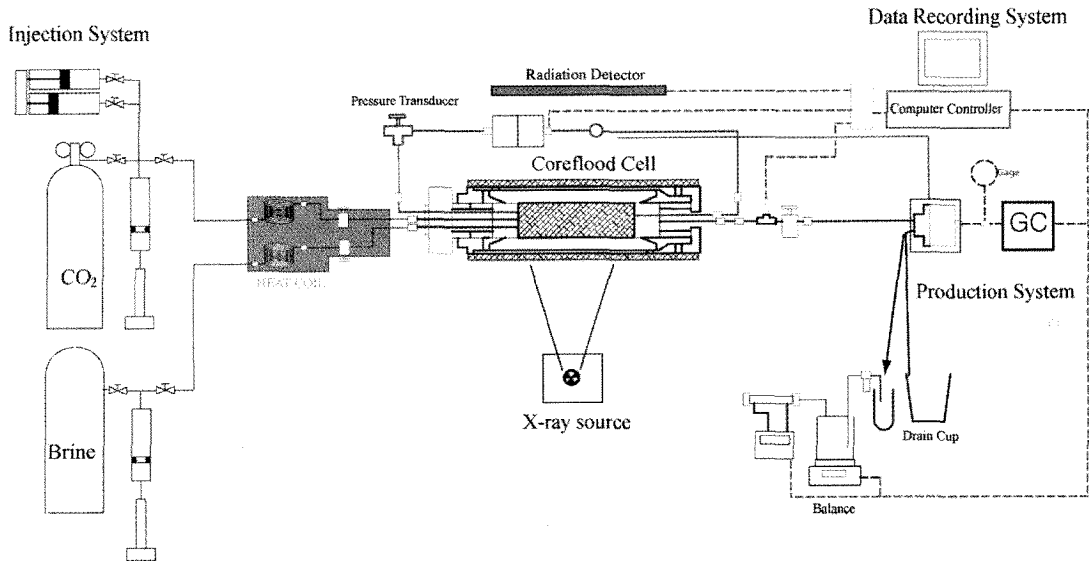


Fig. 4. A schematic diagram of coreflood apparatus.

기장을 소스로하는 MRI를 이용한 실험에서는 금속재질의 코어셀을 사용할 수 없기 때문에 플라스틱 재질의 코어셀을 사용한다. 또한 코어유동실험 동안의 온도조절을 위해 코어홀더나 주입부에 열선 장치를 구성하기도 한다. 생산시스템은 유량계를 이용하여 코어셀을 통과하여 배출되는 유체의 부피를 측정하거나 가스 크로마토그래피(gas chromatograph) 등을 사용하여 구성성분을 측정하는 부분이다. 데이터 기록 시스템에서는 실험이 진행되는 동안 압력과 온도 등을 모니터링하고 기록한다.

코어유동 실험의 결과를 분석하는 방법에는 크게 유출되는 다상유체의 양을 측정하는 정량측정방법과 특정장치를 이용하여 코어의 포화도를 측정하는 방법이 있다. 먼저 정량측정방법은 코어유동 실험 동안 유출되는 이산화탄소와 염수를 분리기를 통해 분리해 각각 그 양을 측정하여 주입유속 및 압력에 따른 투과율 변화를 모니터링하는 방법이다. 그러나 정량측정 방법은 앞서 언급한 것처럼 증발 등으로 인해 유출되는 양을 정확히 측정하는데 오차를 가져올 수 있다. 그래서 최근에는 정량측정방법의 단점을 보완하기 위해 X-ray 촬영, 컴퓨터단층촬영, 자기공명영상 등 측정장비를 사용하여 코어내의 포화도를 측정하고 이를 이용하여 상대투과율을 산정한다.

X-ray 기술은 물질의 거동과 그 공간적 분포에 대한 다양한 연구들 중에서 높은 위치를 점유하고 있으며, 기술이 개발된 이후 오랜 기간동안 실험 및 검증되어

져 왔다(Vineger, 1987; Sprunt *et al.*, 1991). 코어내에서 유체의 포화도 측정은 X-ray 소스부분에서 대상 코어에 대하여 방사능을 방출하면 코어 반대편 감지부(detector)에서 방사선을 가시광선으로 변환해 2차원의 디지털 이미지를 생산하며 스캔한다(Bichenkov *et al.*, 2005). 이렇게 스캔된 이미지는 매질의 밀도에 따라 달라진다. 따라서 건조상태의 이미지와 다상유체의 흐름에 의해 포화된 이미지를 이용하여 코어의 포화도를 계산하게 된다. 이런 X-ray 스캔 기술은 코어의 포화도를 다상유체의 주입에 따라 짧은 시간동안 전체적으로 파악할 수 있다는 장점이 있지만, 대상 매질의 밀도를 3차원이 아닌 2차원적인 평균값으로 표현해내는 단점이 있다(Bichenkov *et al.*, 2005).

X-ray 촬영 기술의 단점을 보완해 만든 장치가 CT 스캐너로서 X-ray 촬영 기술과 유사하나 대상 물체를 회전시키거나 방사능 소스부분과 감지부분이 회전하면서 코어의 길이방향에 대해서 보통 1-3 mm 간격의 컴퓨터화된 영상을 만들어내고 이를 결합시켜 코어 전체에 대한 3차원 이미지를 만들어 낸다는 차이가 있다. CT 스캐너를 이용하면 3차원으로 비교적 정확한 포화도를 만들어 낼 수 있기 때문에 최근 코어유동실험에서 포화도를 산정하기 위해 많이 사용되고 있다. 그러나 코어의 길이 방향에 대해 세분화된 컴퓨터 이미지를 만들어내기 때문에 코어 전체를 촬영하는데 X-ray 스캔 기술에 비해 더 많은 시간이 요구되어 비정상류의 흐름에 대한 포화도를 측정하기에는 어려움이 있다.

자기공명영상(MRI) 기술은 X-ray나 CT 스캐너처럼 방사선을 이용하는 것이 아니라 자기장을 스스로 사용한다. MRI는 물체 외부에서 강한 자기장을 형성시키고 여기에 고주파를 방사하여 각 물체 안의 수소원자핵들이 특정 주파수의 고주파를 흡수하고 방사하던 고주파를 차단할 때 흡수했던 고주파를 다시 방출하는 공명현상을 이용해 물질 내부의 구조를 파악하는 방법이다. MRI를 이용하면 물체의 가로나 세로축뿐만 아니라 사선 방향 등의 이미지를 자유롭게 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 이산화탄소는 수소원자핵을 가지고 있지 않기 때문에 이산화탄소-염수와 같은 코어유동실험에서는 코어내의 직접적인 분포 영상을 얻을 수 없다. 하지만 메탄과 같이 수소원자를 함유한 물질이 코어내에 존재한다면 메탄-이산화탄소 치환작용 같은 간접적인 방법을 통한 이용은 가능하다(Ersland *et al.*, 2009).

4. 연구동향

코어유동실험은 초기 석유와 탄층에서의 메탄(methane)의 회수율을 증가시키기 위한 목적으로 수행되어져 왔다. 최근에는 이산화탄소 지중저장에 대한 관심이 증대되면서 석유저장소와 탄층을 대상으로 수행되었던 실험들을 이산화탄소 지중저장을 위한 파라미터 산정 실험에 응용하게 되었다. 본 절에서는 석유저장소와 탄층의 코어를 이용한 실험연구 사례들을 소개하고 최근 이산화탄소 지중저장과 관련된 실험동향을 소개하고자한다.

4.1. 유전을 대상으로 한 실험(EOR)

유전을 대상으로 한 초기 코어유동실험은 주로 염수 주입을 통한 석유회수율을 관찰하였다(Rathmell *et al.*, 1973; Morrow *et al.*, 1973; Anderson, 1987; Jerauld and Rathmell, 1994). 염수의 농도와 습윤성(wettability)이 오일 회수율에 미치는 영향에 대한 코어유동 실험 연구에서는 염수의 염도가 낮아질수록 회수되는 오일의 양이 많아졌으며, 같은 농도 조건에서 염수를 가열한 후 주입했을때 회수율이 증가함을 확인하였다(Fig. 5). 또한 물에 의한 습윤성이 높을수록 염수의 염도를 낮춰 회수율을 증가시켰다고 보고하였다(Jadhunandan and Morrow, 1991; Webb *et al.*, 2004; McGuire *et al.*, 2005; Agbalaka *et al.*, 2009).

또한 일부 연구에서는 불균질한 매질에서 이산화탄소를 이용한 다상유체유동에 대한 영향과 주입유속에 따른 오일의 우회(bypass)와 부유효과(buoyancy effect) 향상을 위해 사용되는 다양한 기술에 대한 연구를 수행하였다(Hicks *et al.*, 1994; Chakravarthy, 2005). 이를 위해 코어유동실험을 통해 이산화탄소의 주입속도와 매질의 균열에 의한 영향을 파악했으며, CT 스캐너를 이용하여 다상유체유동을 시각화하였다(Withjack, 1987; Vinegar and Wellington, 1987; MacAllister *et al.*, 1990). 실험결과 주입속도는 회수과정에 매우 중요한 역할을 하였으며, 이산화탄소의 주입속도가 높을 경우 오일을 부유시키기 보다는 오일을 우회시키는 비율이 높게 나타났고, 주입속도가 낮은경우 경제적인 관점에서 비효율적으로 나타났다. 또한 이산화탄소의 통과 시간을 지연시키고 균열의 영향을 줄여 회수율을

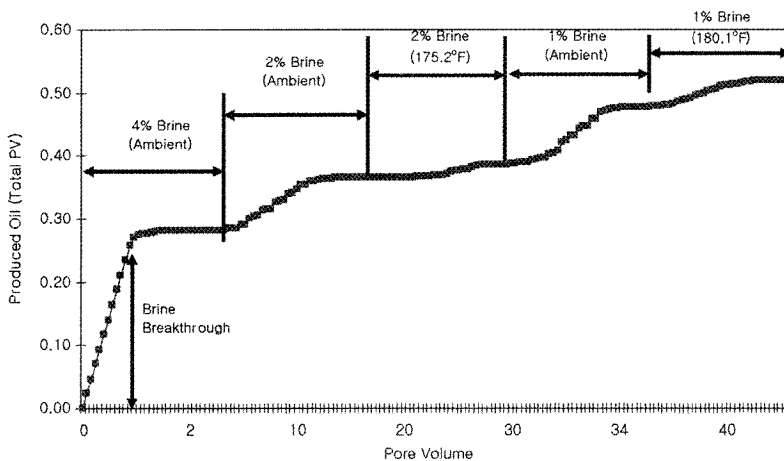


Fig. 5. Effect of brine temperature and salinity on oil recovery (Agbalaka *et al.*, 2009).

높이기 위해서는 물의 점성을 높이는 것보다 겔(gel)을 사용하는 것이 물의 배출문제를 해결하고 균열의 영향을 효과적 해결하는 것으로 나타났다.

4.2. 석탄층을 대상으로 한 실험(ECBM)

석탄층의 메탄과 관련된 연구들은 매질에 존재하는 메탄의 회수율을 높이기 위한 실험과 메탄을 회수하고 난 매질을 이산화탄소의 저장소로 활용한 실험으로 나눌 수 있다. 먼저 코어내에 메탄이 존재하는 상태에서 매질에 이산화탄소를 주입함으로써 발생하는 메탄-이산화탄소의 반확산(counter diffusion)에 의한 치환작용에 대하여 응력 및 투과율 변화에 대한 연구들이 진행되었다. Shi *et al.*(2008)은 석탄코어를 대상으로 이산화탄소 주입에 따른 메탄회수율과 구성성분에 대해 분석하였다(Fig. 6). 응력변화에 대한 연구에서는 석탄매질에 초임계상태의 이산화탄소 주입에 따른 석탄매질의 차별적 팽창현상을 변위센서를 이용한 축압(axial strain)측정을 통해 연구하였다. 이러한 연구를 통해 이산화탄소의 주입압력이 증가할수록 석탄코어가 팽창하는 것을 관찰할 수 있었으며, 이런 팽창현상은 메탄보다는 이산화탄소의 주입이 많을수록 증가하였다(Mazumder and Wolf, 2008; shi *et al.*, 2008; Harpalani and Mitra, 2010).

메탄이 존재하는 코어내에서 수행한 투과율 변화 실험에서는 메탄과 이산화탄소의 치환작용으로 인한 투과율 변화를 관찰하였다. 먼저 다공성 매질에서 이산화탄소의 주입으로 인한 메탄과의 치환작용에 대한 연구에서는 메탄을 함유하고 있는 코어에 정류상태의 이

산화탄소를 주입하면서 주입율에 따른 상대투과율 실험을 실시하였다(Ersland *et al.*, 2009). 이를 통해 메탄-이산화탄소의 교대를 MRI영상을 통해 시각화하고 가스하이드레이트 상태일 때 상대투과율이 감소함을 관찰하였다. 석탄코어샘플에 이산화탄소를 주입하면서 응력변화와 상대투과율 변화를 관찰한 실험에서 주입압력은 메탄회수율 증가에 큰 영향을 미치지 않았으며, 상대투과율 변화실험을 통해 물과 기타 불순물이 메탄-이산화탄소의 치환작용을 방해하는 것으로 나타났다(Mago, 2005; Mazumder and Wolf, 2008).

석탄층 코어에 이산화탄소를 주입하면서 석탄층을 이산화탄소 저장소로 사용했을때 그 저장특성에 대한 연구들도 진행되었다. Siriwardane *et al.*,(2009)는 석탄층에 평행한 코어샘플을 채취하여 공극률을 측정하고 자연 상태의 코어와 균열을 발생시킨 코어를 대상으로 액체와 기체상태의 이산화탄소를 주입하여 투과율을 측정하였다. 투과율실험 결과 균열이 발생한 코어에서 투과율이 높게 나타났으며, 시간이 지남에 따라 압력증가로 균열이 닫히면서 투과율도 감소하는 것으로 나타났다. 또한 석탄층에 초임계 이산화탄소와 탈이온화된 물을 주입하여 이산화탄소의 저장특성변화에 대한 연구가 수행되었다(Massarotto *et al.*, 2009). 이 연구에서는 탈이온화된 물과 이산화탄소를 주입한 후 유도결합플라즈마 분광분석기(ICP-OES)를 이용해 지화학적 반응을 관찰하였으며 코어유동실험을 통해 공극률과 투과율 변화를 관찰했다. 연구결과 초임계 이산화탄소와 물의 주입으로 인해 공극률이 증가했으며, 이는 이산화탄소가 탄산형태로 물에 용해되어 석탄코

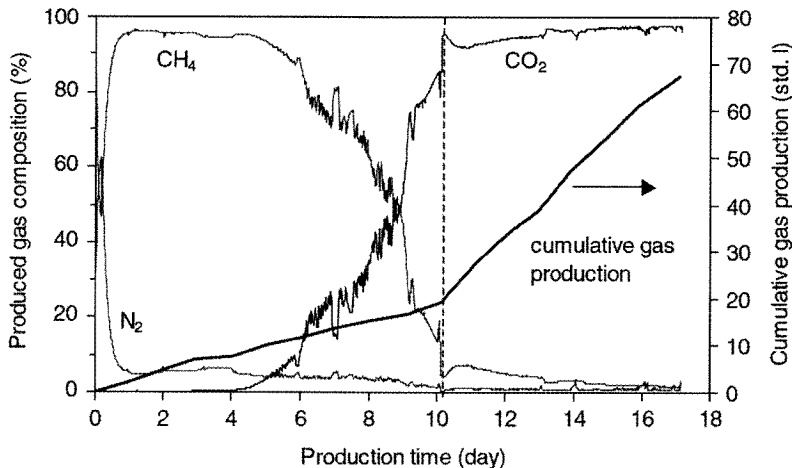


Fig. 6. Measured cumulative gas production and gas composition (Shi *et al.*, 2008).

어의 공극률과 투과율을 증가시킨 것으로 해석하였다.

4.3. 염수층을 대상으로 한 실험(Saline aquifer)

이산화탄소 지층저장에 있어서 안정적인며 효율적으로 주입용량을 증가시키는 것은 매우 중요한 문제이다. 따라서 공극률이 큰 퇴적암의 염수층을 대상으로 염수가 존재하는 코어내에 이산화탄소 주입으로 인해 발생하는 다상유체유동 특성에 대한 많은 실험연구가 진행 중이다(Bachu and Bennion, 2008; Izgec et al., 2008; Perrin et al., 2009).

공극률과 투과계수와의 상관관계를 분석하는 실험에서는 코어시료에 대한 공극률맵(porosity map)을 작성하고 이산화탄소와 염수용액을 코어샘플에 주입하면서 코어의 포화도를 산정하는 코어유동실험이 수행되었다. 정류상태에서 이산화탄소의 공간적 분포는 공극률과 투과율에 깊은 관계를 보이는 것으로 나타났으며, 이산화탄소의 포화도와 상대투과율은 유량에 의존적임을 밝혔다(Krause et al., 2009; Perrin et al., 2009; Perrin and Benson 2010). Fig. 7은 실험결과 중 유량이 이산화탄소 포화도에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 또한 코어유동실험 동안 코어에 작용하는 압력과 투과율

변화를 관찰하여 초기에 투과율이 공극의 단합에 의해 감소하지만 코어 내부에 작용하는 압력이 증가하여 균열이 발생한 이후에는 투과율이 증가함을 알았다(Viete and Ranjith, 2006).

상대투과율에 영향을 미치는 요인분석을 위한 실험에서는 매질의 불균질성과 이산화탄소의 주입속도, 온도, 코어의 방향, 염수의 염도 등 실험조건을 변화시키며 상대투과율 측정에 민감하게 작용하는 요인에 대하여 분석하였다(Izgec et al., 2008). 매질의 불균질성이 미치는 영향에 대한 연구에서는 불균질한 코어를 대상으로 코어유동실험을 실시하고 이때 매질의 특성으로 인한 이산화탄소의 포화도를 CT 스캐너를 이용하여 분석하였다(Perrin and Benson, 2010). 실험결과 이산화탄소의 포화도맵에서 이산화탄소의 공간분포도는 매질의 공극률 분포와 밀접한 관계를 보였으며, 실험값을 바탕으로 한 수치모의에서 공극률은 실험값과 유사하게 나타났지만 투과율의 경우는 실험값과 차이를 보였다(Krause., 2009). 온도변화 조건의 실험에서 온도는 공극률과 투과율에 직접적으로 큰 영향을 미치지 않았으며, 주입속도가 증가할수록 투과율의 감소폭이 적게 나타났다(Izgec et al., 2008). 이산화탄소와 염수의

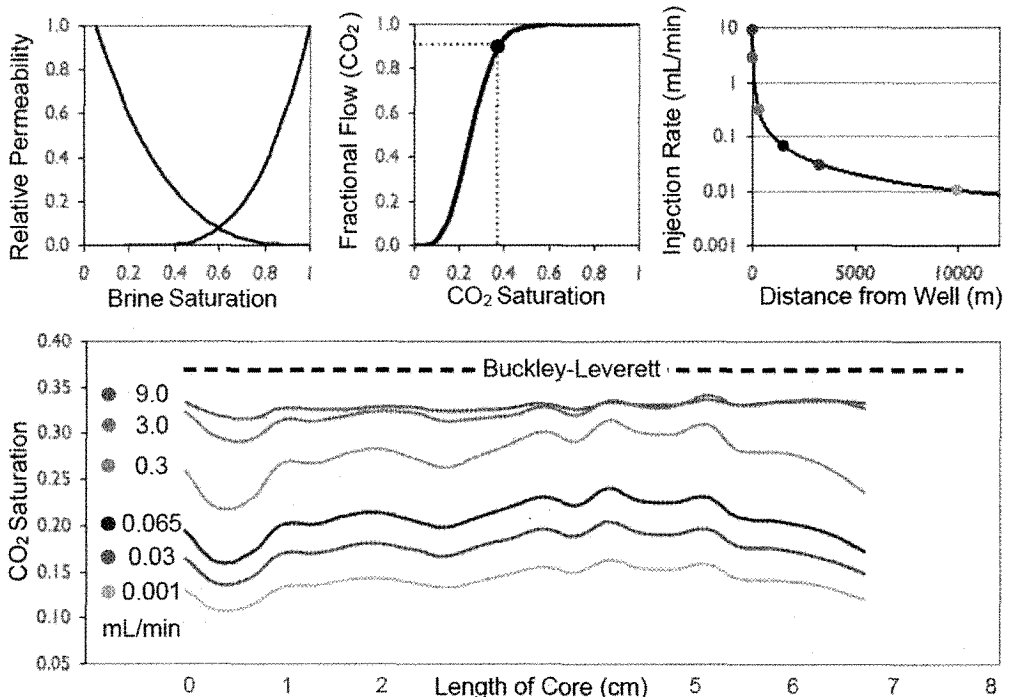


Fig. 7. Effect of flow rate on CO₂ saturation (Benson et al., 2007).

계면장력에 대한 연구에서는 상대투과율은 경계응력이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 이런 계면장력은 주입압력이 증가할수록 감소했으며, 일정한 온도, 압력 조건에서 염도가 높을수록 높게 나타났다. 이런 계면장력에 대한 연구를 통해 염도가 낮고 주입압력이 높을수록 상대투과율이 증가한다는 것을 알았다(Bachu and Bennion., 2008).

이산화탄소의 지중저장과 관련해 덮개암의 기밀성에 대한 실험에서는 덮개암에서의 유동 특성 연구와 바이오필름(biofilm)을 이용한 덮개암의 기밀성 연구가 진행되었다(Li *et al.*, 2006). 덮개암 특성 연구에서는 오일과 가스 저류지의 매질에 이산화탄소를 주입했을 때의 기밀성을 평가하였으며, 오일과 가스 저류지의 덮개암은 이산화탄소의 유동을 막는데 충분치 않기 때문에 이산화탄소를 저장하기 위해서는 덮개암에 대한 재평가가 필요함을 시사했다(Li *et al.*, 2006). 바이오필름에 대한 연구에서는 코어 셀 안에 바이오필름을 주입하고 일정시간 뒤 이산화탄소와 염수를 주입해 초기투과율과 비교해 기밀성을 확인하였다. 전자현미경을 통해 관찰한 결과 코어입자의 표면에 미생물이 피복되었음을 확인하였으며, 초기투과율의 95~99%까지 투과율이 감소함을 확인해 미생물이 이산화탄소의 누수를 줄이는데 효과적인 것으로 판단하였다(Mitchell *et al.*, 2009).

마지막으로 코어유동실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 수치모델을 통해 코어내 유체유동을 모의하는 연구들이 진행되었다(Schembre and Kovsky, 2003; Shi *et al.*, 2009). 이들 연구는 CT 스캐너를 이용하여 공극률맵과 포화도를 작성하고 코어유동실험 과정을 통해 얻은 결과값을 모델의 입력변수로 사용하여 실험 측정값이 모델에서 어떻게 재현되는지를 연구하였다. 연구결과 계산된 상대투과율 값은 입력커브와 잘 부합해 시스템에 대한 신뢰성을 제공하였으며, 수치모사를 통해 코어유동실험동안 발생하는 모세관압의 영향에 대해 분석하였다.

5. 결 언

국제사회에서 이산화탄소 지중저장에 대한 필요성과 중요성에 대해서는 이견이 없으며, 일부 선진외국에서는 이미 상용화단계에 접어들었다. 국내에서도 최근 이산화탄소 지중저장에 대한 중요성이 부각되고 있으며, 여러 국가연구개발과제가 수행중에 있다. 이산화탄소 지중저장을 위해서는 저장대상 지층의 특성화 및 주입

조건을 고려한 기초연구들이 먼저 진행되어야 실제 주입 시 주입율과 저장안정성 평가를 위한 기초 파라미터들을 제공할 수 있다.

본 해설에서 살펴본 국외 선행연구에 의하면 이산화탄소 지중저장을 위해 현장상황을 고려한 코어내의 유동 및 응력 변화에 대한 다각도의 연구들이 진행되고 있다. 초기의 코어유동실험은 석유와 메탄가스의 회수율을 증진시키기 위한 방향으로 연구들이 진행되어 왔으며, 이후 이산화탄소 지중저장과 관련해 다상유체의 상대투과율 산정, 상대투과율값을 좌우하는 요인, 매질의 불균질성이 갖는 영향, 덮개암의 특성, 수치모델을 통한 유체유동 재현 등에 대한 연구들이 진행되고 있다.

이산화탄소 지중저장 연구와 관련하여 많은 실험연구가 진행되고 있지만 특정 실험조건에서의 단편적인 결과들이 대부분이며, 특히 이산화탄소의 포획기작에 큰 영향을 미치는 상대투과율과 모세관압의 이력특성(hysteresis)을 고려한 실험이 부족하다. 그러나 실험을 위해서는 적지 않은 인프라, 인력, 비용 등이 요구되며, 개별 연구기관에서 다양한 실험조건을 고려한 충분한 실험데이터를 축적하는 것은 힘들 것으로 보인다. 미국 스탠포드 대학에서는 정보공유를 위해 다양한 코어 시료에 대한 공극률, 고유투과계수, 상대투과율 값을 실험조건과 함께 웹(<http://pangea.stanford.edu/research/bensonlab/relperm/index.html>)에 공유하고 있다. 따라서 국제적인 공동 네트워크를 구축하여 다양한 연구기관에서 실험결과들을 서로 공유할 수 있다면 이런 문제점들을 일정부분 해결할 수 있을 것이다. 이산화탄소 지중저장에 있어서 이제 시작 단계인 국내에서도 실증에 앞서 저장후보지 매질을 대상으로 한 코어유동실험과 같은 기초연구가 선행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “CO₂ 지중저장 요소기술 개발 기획연구” 과제 및 산업기술협동연구사업인 “저탄소 녹색성장을 위한 CO₂ 지중주입 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 해설의 심사를 맡아 유익한 조언을 해주신 왕수균 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

Agbalaka, C.C., Dandekar, A.Y., Patil, S.L., Khataniar, S. and Hemsath, J.R. (2009) Coreflooding Studies to

- Evaluate the Impact of Salinity and Wettability on Oil Recovery Efficiency. *Transp Porous Med.*, v.76, p.77-94.
- Alkan, H., Cinar, Y. and Ulker, E.B. (2010) Impact of capillary pressure, salinity and in situ conditions on CO₂ injection into saline aquifers. *Tranp. Porous Med.* DOI 10.1007/s11242-010-9541-8.
- Anderson, W.G. (1987) Wettability literature survey-part 6: the effects of wettability on waterflooding. *J. Petrol. Technol.*, v.39, p.1605-1622.
- Bachu, S. and Bennion, B. (2008) Effects of in-situ conditions on relative permeability characteristics of CO₂-brine systems. *Environ Geol.*, v.54, p.1707-1722.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P. and Mathiassen, O.M. (2007) CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.1, p.430-443.
- Bennion, B. and Bachu, S. (2008) Drainage and imbibition relative permeability relationships for supercritical CO₂/brine and H₂S/brine systems in intergranular sandstone, carbonate, shale, and anhydrite rocks. *SPE Res. Eval. Eng.*, v.11(3), p.487-496.
- Benson, S., Miljkovic, L., Tomutsa, L. and Doughty, C. (2007) Relative permeability and capillary pressure controls on CO₂ migration and brine flow. Sixth annual conference on carbon capture & sequestration. NETL.
- Bichenkov, E.I., Palchikov, E.I., Sukhinin, S.V., Chermisin, A.N., Romanov, A.L., Romanyuta, M.A. and Seleznev, K.S. (2005) New X-ray techniques for flow visualization and measurement of hydrodynamic flow parameters in opaque heterogeneous media. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, V.46, No.6, p.901-910.
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P. and Mathiassen, O.M. (2007) CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.1, p.62-68.
- Burton, M., Kumar, N. and Bryant, S.L. (2009) CO₂ injectivity into brine aquifers: why relative permeability matters as much as absolute permeability. *Energy Procedia*, v.1, p.3091-3098.
- Bye, A.L., Rennan, L., Wideroe, H.C., Boassen, T. and Ringen, J.K. (2008) Residual gas distribution in vuggy carbonate by use of X-ray, NMR, and Cryo-ESEM. SCA.
- Chakravarthy, D. (2005) Application of X-ray CT for investigation fluid flow and conformance control during CO₂ injection in highly heterogeneous media. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University.
- Chang, Y.B., Coats, B.K. and Nolen, J.S. (1998) A compositional model for CO₂ floods including CO₂ solubility in water. Paper SPE 365161, SPE Permian Basin Oil & Gas Recovery Conference, Midland, TX, p.27-29.
- Chiquet, P., Broseta, D. and Thibeau, S. (2005) Capillary alteration of shaly caprocks by CO₂. Paper SPE 94183, SPE/EAGE Conference, Madrid, Spain.
- Choi, B.-Y., Chae, G.-T., Kim, K.-H. and Yun, S.-T. (2009) Reactive transport modeling on the behavior of CO₂ and SO₂ injected into deep saline aquifer. *J. Geologic. Soc. Kor.*, v.45, p.473-484.
- Doughty, C., Pruess, K., Benson, S., Hovorka, S., Knox, P. and Green, C. (2001) Capacity investigation of brine-bearing sands of the Frio-Formation for geological sequestration of CO₂. Proceedings of First National Conference on Carbon Sequestration, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.
- Doughty, C. (2010) Investigation of CO₂ plume behavior for a large-scale pilot test of geologic carbon storage in a saline formation. *Transp. Porous Med.*, v.82, p.49-76.
- Ersland, G., Husebo, J., Graue, A. and Kvamme, B. (2009) Transport and storage of CO₂ in natural gas hydrate reservoirs. *Energy Procedia*, v.1, p.3477-3484.
- Harpalani, S. and Mitra, A. (2010) Impact of CO₂ Injection on Flow Behavior of Coalbed Methane Reservoirs. *Transp Porous Med.*, v.82, p.141-156.
- Hassler, G.L. and Brunner, E. (1945) Measurement of capillary pressures in small core samples. *Petroleum Transaction, AIME*, v.160, p.114-123.
- Hicks Jr., P.J. and Narayanan, R.K. (1994) An Experimental Study of Miscible Displacements in Heterogeneous Carbonate Cores Using X-Ray CT. paper SPE 20492, SPE Formation Evaluation, p.55-60.
- IPCC, 2007, climate change 2007: The physical science basis. Fourth assessment report, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.
- Izgec, O., Demiral, B., Bertin, H. and Akin, S. (2008) CO₂ injection into saline carbonate aquifer formations I: laboratory investigation. *Transp Porous Med.*, v.72, p.1-24.
- Jadhunandan, P.P. and Morrow, N.R. (1991) Effect of wettability on waterflood recovery for crude-oil/brine/rock systems. Paper SPE 22597, presented at the 66th Annual Technical Conference and Exhibition.
- Jerauld, G.R. and Rathmell, J.J. (1994) Wettability and relative permeability of Prudhoe bay: A case study in mixedwet reservoirs. Paper SPE 28576 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Kim, J.-H., Kim, J.-M. and Wang, S. (2009) Numerical simulation of impacts of mineralogical compositions on efficiency and safety of geologic storage of carbon dioxide in deep sandstone aquifers. *J. Geologic. Soc. Kor.*, v.45, p.493-516.
- Kim, T., Kim, J.-C. and Yum, B.-W. (2009) Current status of CO₂ injection system for geologic sequestration in foreign countries. *J. Geologic. Soc. Kor.*, v.45, p.557-568.
- Kopp, A., Class, H. and Helmig, R. (2009) Investigations of CO₂ storage capacity in saline aquifers. Part 1. Dimensional analysis of flow processes and reservoir characteristics. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.3, p.263-276.
- Kopp, A., Class, H. and Helmig, R. (2009) Investigations of CO₂ storage capacity in saline aquifers. Part 2: Estimation of storage capacity coefficients. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.3, p.277-287.
- Krause, M.H. (2009) Modelling sub-core scale permeability in sandstone for use in studying multiphase flow of CO₂ and brine in core flooding experiments.

- Submitted to the department of energy resources engineering of Stanford university.
- Krause, M., Perrin, J.-C., Kuo, C.-W. and Benson, S.M. (2009) Characterization of CO₂ storage properties using core analysis techniques and thin section data. *Energy Procedia*, v.1, p.2969-2974.
- Kumar, A., Ozah, R., Noh, G., Pope, G.A., Bryant, S., Sepehrnoori, K. and Lake, L.W. (2005) Reservoir simulation of CO₂ storage in deep saline aquifers. *SPE J.*, v.10(3), p.336-348.
- Lee, Y.-S., Park, Y.-C., Kwon, S.-I. and Sung, W.-M. (2008) The feasibility study for CO₂ sequestration into deep saline aquifer at Goraev structure in Korea.
- Lee, W.S., Huh, D.G., Sung, W.M. and Kim, H.T. (1996) The measurement of two-phase relative permeability by unsteady-state method. *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, 45, 381-393.
- Li, Z., Dong, M., Li, S. and Huang, S. (2006) CO₂ sequestration in depleted oil and gas reservoirs-caprock characterization and storage capacity. *Energy Conversion and Management*, v.47, p.1372-1382.
- MacAllister, D.J., Miller, K.C., Graham, S.K. and Yang, C.T. (1990) Application of X-Ray CT Scanning to the Determination of Gas-Water Relative Permeabilities. paper SPE 20494 presented at the 1990 Annual Technical Conference and Exhibition
- Mago, M.N.D. (2005) Effect of flue gas impurities On the process of injection and storage of carbon dioxide in depleted gas reservoirs. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University.
- Massarotto, P., Golding, S.D., Bae, J.-S., Iyer, R. and Rudolph, V. (2009) Changes in reservoir properties from injection of supercritical CO₂ into coal seams-A laboratory study. *International Journal of Coal Geology*.
- Mazumder, S. and Wolf, K.H. (2008) Differential swelling and permeability change of coal in response to CO₂ injection for ECBM. *International Journal of Coal Geology*, v.74, p.123-138.
- McGuire, P.L., Chatham, J.R., Paskvan, F.K., Sommer, D. M. and Carini, F.H. (2005) Low salinity oil recovery: an exciting EOR opportunity for Alaska's North Slope. Paper SPE 93903 presented at the SPEWestern Regional Meeting.
- Medina, C.R., Barnes, D.A. and Rupp, J.A. (2008) Depth relationships in porosity and permeability in the Mount Simon Sandstone (Basal Sand) of the midwest region: Application for carbon sequestration. Society of Petroleum Engineers, Pittsburgh, Pennsylvania.
- Mitchell, A.C., Phillips, A.J., Hiebert, R., Gerlach, R., Spangler, L.H. and Cunningham, A.B. (2009) Biofilm enhanced geologic sequestration of supercritical CO₂. *international journal of greenhousegas control*, v.3, p.90-99.
- Ministry of Knowledge Economy, 2009. <http://mke.go.kr>
- Morrow, N.R., Cram, P.J. and McCaffrey, F.G. (1973) Displacement studies in dolomite with wettability control by octanoic acid. *Trans. AIME* v.255, p.221-232.
- Palchikov, E.I., Schemelinin, Y.A., Skripkin, A.G., Mekhontsev, D. and Kondratiev, N.A. (2006) Mapping of Residual Oil and Water Saturation in Porous Media by Means of Digital X-ray Laminography. *Particle and Particle Systems Characterization*, v.23(3-4), p.254-259.
- Perrina, J.-C., Krause, M., Kuo, C.-W., Miljkovic, L., Charoba, E. and Benson, S.M. (2009) Core-scale experimental study of relative permeability properties of CO₂ and brine in reservoir rocks. *Energy Procedia*, v.1, p.3515-3522.
- Perrin, J.-C. and Benson, S. (2010) An Experimental Study on the Influence of Sub-Core Scale Heterogeneities on CO₂ Distribution in Reservoir Rocks. *Transp Porous Med.*, v.82, p.93-109.
- Plug, W.-J. and Bruning, J. (2007) Capillary pressure for the sand-CO₂-water system under various pressure conditions; application to CO₂ sequestration. *Adv. Water Resour.*, v.30, p.2239-2353.
- Purcell, W.R. (1949) Capillary pressure-Their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom. *Petroleum Transactions, AIME*, p.39-48.
- Rathmell, J.J., Braun, P.H. and Perkins, T.K. (1973) Reservoir waterflood residual oil saturation from laboratory tests. *J. Petrol. Technol.* v.25, p.175-185.
- Schembre, J.M. and Kovscek, A.R. (2003) A technique for measuring two-phase relative permeability in porous media via X-ray CT measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.39, p.159-174.
- Siriwardane, H., Haljasmaa, I., McLendon, R., Irdi, G., Soong, Y. and Bromhal, G. (2009) Influence of carbon dioxide on coal permeability determined by pressure transient methods. *International Journal of Coal Geology*, v.77, p.109-118.
- Shi, J.-Q., Mazumder, S., Wolf, K.-H. and Durucan, S. (2008) Competitive Methane Desorption by Supercritical CO₂ Injection in Coal. *Transp Porous Med.*, v.75, p.35-54.
- Shi, J.-Q., Xue, Z. and Durucan, S. (2009) History matching of CO₂ core flooding CT scan saturation profiles with porosity dependent capillary pressure. *Energy Procedia*, v.1, p.3205-3211.
- Son, H., Kwon, S. and Sung, W. (2006) Analytical approach of CO₂ sequestration in a deep confined aquifer. *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, v.43, p.275-281.
- Sprunt, E., Desal, K., Coles, M., *et al.* (1991) CT-scan-monitored electrical-resistivity measurements show problems achieving homogeneous saturation. *SPE Formation Evaluation*, v.6, p.134-140.
- Sung, W.-M., Choi Y.-J. and Huh D.-G. (1993) Determination of two-phase relative permeability by numerical approach. *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*. v.30, p.1-10
- Ulker, E.B. (2009) Investigation of the CO₂ storage capacity of aquifer structures: CO₂ storage in a Bunt-sandstein prototype aquifer. PhD Thesis, Clausthal University of Technology, Germany.
- Ulker, E.B., Alkan, H. and Pusch, G. (2007) Implication of the phase-solubility behaviour on the performance predictions of the CO₂ trapping in depleted gas reservoirs and aquifers. SPE 107189-MS SPE/EAGE Annual Conference & Exhibition, UK.
- Viete, D.R. and Ranjith, P.G. (2006) The effect of CO₂ on the geomechanical and permeability behaviour of brown coal: Implications for coal seam CO₂ seques-

- tration. *International Journal of Coal Geology*, v.66, p.204-216.
- Vinegar, H.J. and Wellington, S.L. (1987) Tomographic Imaging of Three-Phase Flow Experiments, *Rev. Sci. Instrum.* 58p.
- Wang, S., Lee, M., Park, M.K. and Kim, J.-M. (2010) Box experiments on monitoring the CO₂ migration in a homogeneous medium using electrical resistivity survey. *Geosciences Journal*, v.14, p.77-85.
- Webb, K.J., Black, C.J.J. and Al-Ajeel, H. (2004) Low-salinity oil recovery-log-inject-log. Paper SPE 89379, SPE/DOE 14th Symposium on Improved Oil Recovery.
- Wellington, S.L. and Vinegar, H.J. (1987) X-Ray Computerized Tomography. paper SPE 16983.
- Withjack, E.M. (1987) Computed Tomography for Rock-Property Determination and Fluid-Flow Visualization. paper SPE 16951 presented at the 1987 SPE Annual Technical Conference and Exhibition.

2010년 4월 21일 원고접수, 2010년 6월 20일 게재승인