



Article

## 남해대륙붕 시추공별 덮개암 후보지층 기밀성 평가

민해용, 이찬우, 이대성\*

동아대학교 환경·에너지공학부 에너지·자원공학

### Assessment of sealing capacity of caprock candidate formations for each borehole in the South Sea Continental Shelf

Haeyong Min, Chanwoo Lee, Dae Sung Lee\*

Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Republic of Korea

Received: December 29, 2025 / Revised: February 6, 2026 / Accepted: February 11, 2026

\*Corresponding author: +82-51-200-7770 / E-mail: leeds@dau.ac.kr

**요약:** 남해대륙붕 4개 광구의 6개 시추공에서 확보된 덮개암 시추압편을 대상으로 수은주입 모세관압(MICP) 시험을 수행하여 공극 구조 및 모세관 특성에 기반한 덮개암 기밀성을 정량적으로 평가하였다. 시추공 자료와 암상 정보를 토대로 덮개암 대상 구간을 선정하고 대표 심도에서 시료를 확보한 뒤, 공극 크기 분포, 공극률, 투과도, 공극진입압력, 유동압력, 돌파압력 등을 산정하였다. 또한 CO<sub>2</sub>-염수 및 석유-염수 계에 대한 접촉각과 계면장력을 적용하여 모세관압에 상응하는 허용 가능 CO<sub>2</sub> 및 석유 기둥 높이를 계산하고, 자유수면-수포화도 관계를 이용해 시추공별 기밀성을 비교하였다. 분석 결과, 모든 시료에서 1 μm 이하의 나노 공극이 총 공극 부피를 지배하였으나, 공극 크기 분포와 나노·마이크로 공극의 상대적 비율은 시추공별로 크게 달라 이질성이 확인되었다. 공극진입압력과 유동압력은 0.2~36 MPa 범위에 분포하였고, 돌파압력은 약 75~283 MPa로 나타나 시료별 모세관 차단 능력의 편차가 컸다. 특히 G-1과 J5-4 시료는 283 MPa로 가장 높은 돌파압력과 최대 허용 CO<sub>2</sub> 기둥 높이인 6,012 m를 보여 우수한 기밀성을 나타낸 반면, J1-1 시료는 75 MPa로 낮은 돌파압력과 최소 CO<sub>2</sub> 기둥 높이인 1,586 m로 기밀성 취약 구간으로 평가되었다. CO<sub>2</sub>-염수 계에서의 최대 허용 CO<sub>2</sub> 기둥 높이는 약 1,586~6,012 m 수준, 석유-염수 계에서의 허용 가능 석유 기둥 높이는 약 2,157~8,175 m 수준으로 산정되었다. 전반적으로 남해대륙붕 덮개암은 CO<sub>2</sub> 저장에 적합한 기밀성을 보이나, 시추공별 공극 구조 및 모세관 특성의 공간적 이질성이 커서 CO<sub>2</sub> 저장소 설계 시 세분화된 덮개암 평가가 요구된다.

**주요어:** 남해대륙붕, 덮개암, 수은주입 모세관압, CO<sub>2</sub> 허용 기둥 높이, 자유수면

**ABSTRACT:** Mercury intrusion capillary pressure (MICP) analyses were conducted on caprock core chips obtained from seven wells across four exploration blocks in the southern offshore Korean continental shelf. Caprock intervals were selected based on well logs and lithofacies information, and representative-depth samples were analyzed to determine pore-size distribution, porosity, permeability, pore-entry pressure, threshold pressure, and breakthrough pressure. Contact angles and interfacial tensions for CO<sub>2</sub>-brine and oil-brine systems were applied to convert capillary pressures into allowable CO<sub>2</sub> and oil column heights, and caprock sealing capacities were compared using the relationship between free-water level and water saturation. Although pores smaller than 1 μm dominated the total pore volume in all samples, the distribution of pore sizes and the relative proportions of nano and micro scale pores varied significantly among wells, indicating strong heterogeneity in pore structures. Pore-entry and threshold pressures ranged from 0.2 to 36 MPa, while breakthrough pressures varied widely from approximately 75 to 283 MPa. Samples G-1 and J5-4 exhibited the highest breakthrough pressure (283 MPa) and maximum allowable CO<sub>2</sub> column height (6,012 m), indicating excellent sealing capacity; in contrast, sample J1-1 showed the lowest breakthrough pressure (75 MPa) and minimum CO<sub>2</sub> column height (1,586 m), suggesting a potential weakness in capillary sealing. The maximum allowable CO<sub>2</sub> column heights for the CO<sub>2</sub>-brine system ranged from 1,586 to 6,012 m, whereas allowable oil column heights based on breakthrough pressure for the oil-brine system were higher, at 2,157 to 8,175 m. Overall, the caprocks of the southern Korean continental shelf exhibit favorable sealing capacities for geological CO<sub>2</sub> storage; however, substantial heterogeneity in pore structures and capillary properties among wells highlights the need for spatially refined caprock assessments in storage-site design.

**Key words:** South Sea Continental Shelf, caprock, mercury injection capillary pressure, CO<sub>2</sub> column height, free water level

## 1. 서론

기후변화와 탄소중립 요구가 가속화되면서 이산화탄소 포집·저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술은 전 세계적으로 중요한 저감 수단으로 인식되고 있다. 특히 심부 해양 퇴적분지를 활용한 지중저장은 장기적인 대규모 CO<sub>2</sub> 처분이 가능하다는 점에서 주목받고 있으며, 염수층, 고갈 유가스전 등을 대상으로 저장 잠재력 평가가 활발히 진행되고 있다. 한편, 단기간 내 화석연료 의존을 완전히 해소하기 어려운 현실을 고려하면, 국내 퇴적분지의 유가스 부존 가능성을 재평가하는 작업 역시 여전히 중요하다. 이러한 이유로 남해대륙붕 퇴적분지는 석유 탐사와 CO<sub>2</sub> 저장 잠재성 평가를 동시에 진행할 수 있는 중요한 대상 지역이다.

CO<sub>2</sub> 지중저장과 유가스 부존 시스템의 안정성은 저류층의 특성뿐만 아니라, 저류층 상부 덮개암의 기밀성에 크게 의존한다(Schwalter, 1979; Bjørlykke, 2010). 덮개암은 일반적으로 셰일, 이암, 점토암 등 세립질 퇴적암으로 구성되며, 낮은 투수성과 높은 모세관압을 통해 탄화수소 및 CO<sub>2</sub>의 상향 이동을 억제하는 역할을 한다. 그러나 실제 심부 환경의 덮개암은 공극 구조, 광물조성, 심도에 따른 압밀과 변형, 균열, 층리 발달 정도 등에 따라 기밀성이 크게 달라질 수 있다. 동일 퇴적분지 내에서도 시추공 간, 심도별 덮개암 특성이 이질적으로 나타날 수 있기 때문에, 분지 규모의 석유계 분석과 CO<sub>2</sub> 저장소 설계에서는 덮개암의 기밀성을 정량적으로 평가하고 비교하는 과정이 필수적이다(Fjaer *et al.*, 2008; Zoback and Gorelick, 2012).

남해대륙붕 퇴적분지는 제주분지를 포함하여 과거 유가스 탐사를 위해 다수의 탄성파 탐사와 시추조사가 수행된 해상 분지로, 구조 함몰과 퇴적층 층서, 저류층 분포에 관한 기초 자료는 상당 부분 축적되어 있다. 그러나 기존 자료는 주로 구조·저류층 평가에 초점이 맞추어져 있어, 덮개암의 모세관 특성이나 허용 CO<sub>2</sub> 및 석유 기동 높이와 같은 밀봉관점의 정량적 평가는 제한적이었다. 또한 해상 시추의 특성상 연속 코어를 충분히 확보하기 어려워, 덮개암에 대한 실험 자료가 부족하다는 한계가 있다. 이로 인해 남해대륙붕 내 여러 광구와 시추공을 대상으로 덮개암의 기밀성을 체계적으로 비교 평가하고, 그 이질성을 정량적으로 파악하는 연구는 아직 미흡한 실정이다(Hangx and Spiers, 2009; Gaus, 2010).

덮개암의 기밀성을 정량적으로 평가하기 위한 대표적인 방법 중 하나가 수은주입 모세관압(Mercury Injection Capillary Pressure, MICP) 시험이다. 수은주입 모세관압(MICP) 시험은 다양한 압력 단계에서 수은을 암석 공극 내로 주입하여 모세관압-포화도 곡선을 획득하고, 이를 바탕으로 공극 크기 분포, 공극률, 투과도, 공극진입압력, 유동압력, 돌파압

력 등을 산정하는 기법(Katz and Thompson, 1987; Daniel and Kaldi, 2009)이다. 이러한 모세관압 특성값은 접촉각과 계면장력, 유체 간 밀도 차이를 고려하면 석유-염수 및 CO<sub>2</sub>-염수 계 각각에 대한 허용 기동 높이로 환산할 수 있어, 덮개암이 장기적으로 지탱할 수 있는 부존 높이와 주입 가능 압력을 평가하는 데 직접적으로 활용할 수 있다(Busch *et al.*, 2008; Krevor *et al.*, 2015).

본 연구는 남해대륙붕 4개 광구에 분포하는 6개 시추공을 대상으로 시추자료를 분석하여 덮개암 구간을 도출하고, 해당 구간에서 확보한 시추암편을 이용해 덮개암 특성을 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 먼저 각 시추공에 대해 지층 구조와 암상, 물리검층 자료를 종합하여 저투수성 세립질 퇴적층으로 구성된 덮개암 구간을 선정하고, 그 구간에서 대표 심도의 암편 시료를 선별하였다. 선별된 시료에 대해 수은주입 모세관압(MICP) 시험을 실시하여 공극 크기 분포와 모세관 특성을 도출하고, 석유-염수 및 CO<sub>2</sub>-염수 계에 대한 접촉각과 계면장력 조건을 적용하여 각 모세관압 단계에서의 허용 가능 석유 및 CO<sub>2</sub> 기동 높이를 산정하고 시추공별 덮개암 기밀성을 비교하였다.

## 2. 연구 지역 및 덮개암 시료

연구 지역 남해대륙붕 퇴적분지에서는 지질구조와 퇴적환경 해석을 바탕으로, 낮은 투수성과 층서적 연속성을 갖는 세립질 암석대인 셰일을 덮개암으로 설정하였다(Schwalter, 1979; Bjørlykke, 2010). 이를 위해 한국석유공사에서 보유하고 있는 9개 시추공의 심도별 암상 자료와 물리검층 자료를 종합 분석하여 셰일·이암 등 미세 입자 암석이 우세하게 분포하는 구간을 덮개암으로 간주하였다(Daniel and Kaldi, 2009; IEAGHG, 2024). 그 결과 P, O, G, J1, J2, J3, J4, J5, B 시추공에서 각기 다른 심도의 덮개암 구간이 도출되었으며, P 시추공은 약 829~940 m, G 시추공은 850~1,750 m, J1 시추공은 947~1,553 m, J3 시추공은 1,010~2,000 m, J5 시추공은 1,000~1,900 m, B 시추공은 2,200~4,100 m 구간이 덮개암으로 선정하였다. 하지만 O와 J2, J4 시추공의 경우 덮개암 구간을 선정하였으나 시추암편 시료를 확보하지 못해 이후 실험 대상에서는 제외하였다(그림 1).

시추암편 시료는 한국석유공사 및 한국지질자원연구원 코어센터에 보관 중인 시료를 활용하였다. 앞서 선정된 덮개암 구간을 기준으로 4개 광구의 6개 시추공(P, G, J1, J3, J5, B)에서 암편을 취득하였으며, 각 시추공별로 덮개암 구간 내 여러 심도에서 시료를 확보하였다. P 시추공은 약 945~997 m 구간에서 10개, G 시추공은 3개, J1 시추공은 6개, J3 시추공은 9개, J5와 B 시추공은 각각 5개 심도의 암편 시료를 확보하는 등 시추공별로 덮개암 구간을 대표할 수 있도록

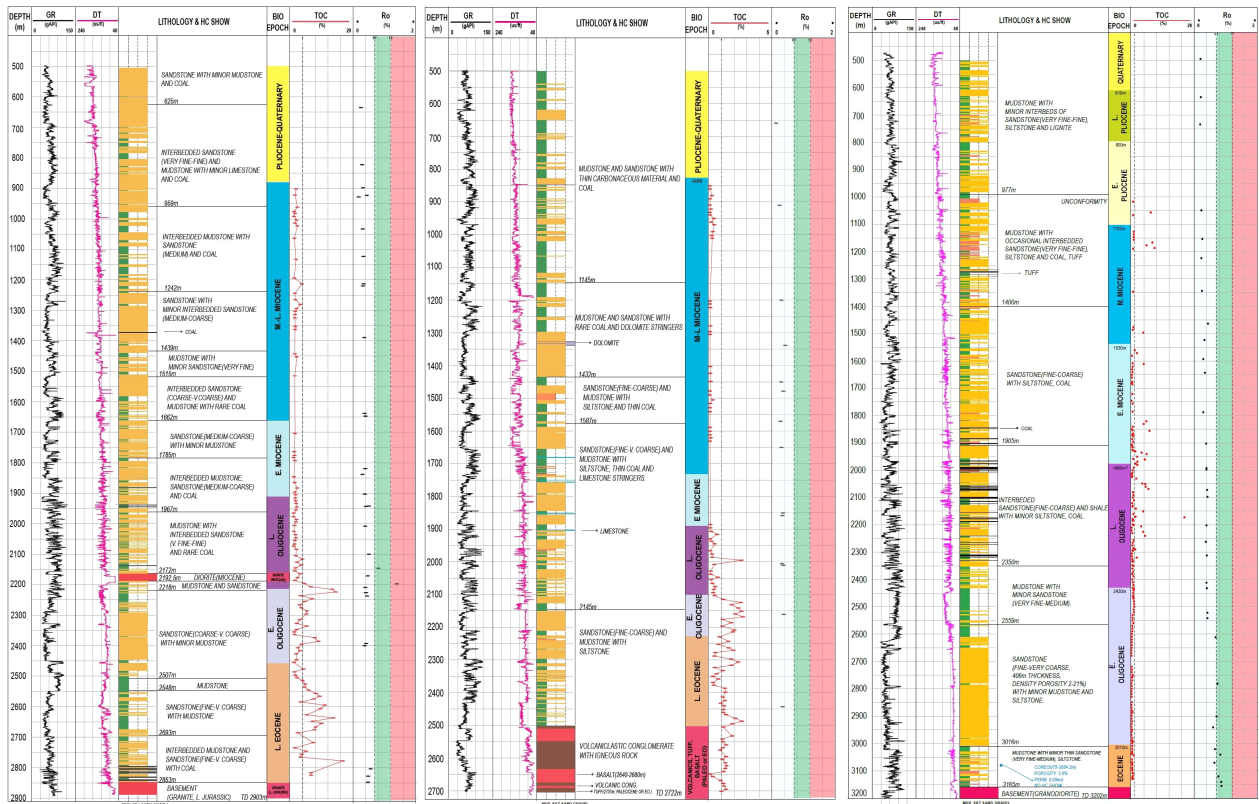


Fig. 1. Lithology log by depth of O, G and J2 drilling well.

Table 1. Drilling cuttings obtained by drilling well and depth of acquisition.

Block	IV	V	JDZ	VI-2		
Borehole	P	G	J1	J3	J5	B
Cuttings sample acquisition depth (m)	945	980 (G-1)	1,088	1,280-1	1,586	2,480~2,490 (B-1)
	948	1,180 (G-2)	1,145	1,280-2	1,680 (J5-4)	2,740~2,745 (B-2)
	951	1,380	1,178	1,290 (J3-2)	1,730 (J5-7)	2,755~2,760 (B-3)
	954		1,211	1,470	1,845	3,665~3,670 (B-4)
	957		1,247 (J1-1)	1,570 (J3-3)	1,920	3,680~3,685 (B-5)
Cuttings sample name	969		1,274 (J1-5)	1,590 (J3-6)		
	972			1,600		
	981 (P-1)			1,630		
	994 (P-3)			1,760		
	997 (P-2)					
Interval count	10	3	6	9	5	5
Sampling organization			KIGAM			KNOC

다수의 시료를 확보하였으며, 각 시추공 및 심도별 시추암편 취득 현황은 표 1에 정리하였다.

수집된 시추암편은 먼저 시료 보관 및 세척 상태를 검토하여 심하게 훼손되었거나 오염이 의심되는 시료를 제외하였다. 이후 남은 시료들 가운데 덮개암의 기밀성에 직접적인 영향을 미치는 이암 파편이 충분히 포함된 심도를 우선 고려하여, 시추공별로 1개 이상 대표 심도에서 MICP 분석용 암편 시료를 최종 선별하였다(그림 2). 이 과정에서 일부 심도에서는 이암 이외의 광물 파편이 혼재된 암편 시료도 포함시켰는데, 이는 비(非)이암 성분이 공극 구조와 모세관 특성에 어떤 영향을 미치는지, 그리고 실제 덮개암 기밀성 평가에 어느 정도 기여하는지를 검토하기 위함이다.

### 3. 분석 방법

남해대륙붕 덮개암의 공극구조 특성과 기밀성을 정량적으로 평가하기 위해 수은주입 모세관압(MICP) 시험을 수행하였다(Katz and Thompson, 1987; Daniel and Kaldi, 2009). 덮개암의 모세관압, 공극 분포, 공극률 등을 산출하여 CO<sub>2</sub> 지중저장 안정성 평가에 활용하고자 하였다. 건조 후 감압 상태에서 초기 공극 내 공기를 제거한 암편시료에 비습윤상 유체인 수은을 점진적으로 주입하여 주입압력에 따른 수은 침투량을 측정하여 공극 구조와 모세관압 특성을 계산한다.

공극목반경은 Young-Laplace 관계식(식 1)을 적용하여 모세관압으로부터 산정하였으며, 이는 Young (1805)와 Laplace (1806)의 연구에 기반한다.

$$P_c = - \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (1)$$

여기서  $P_c$ 는 모세관압(psi),  $\gamma$ 는 수은의 표면장력(dyne/cm),  $\theta$ 는 접촉각(degree),  $r$ 은 공극목반경( $\mu\text{m}$ )이다. 시추 과정에서 회수된 덮개암 구간의 시추암편 중 1~4 mm 크기로 선별된 암편시료를 사용하였으며, 저압 단계에서부터 최대 약 414 MPa까지 단계적으로 수은을 주입하면서 주입압력 단계별 수은 침투량을 측정하였다. 수은은 암석에 대한 비습윤상 유체로서 미세 공극까지 침투가 가능하므로, 주입압-침투량 자료로부터 모세관압-수은 포화도 곡선을 도출하고, 이를 이용하여 공극률, 투과도, CO<sub>2</sub> 및 석유 허용 기동 높이와 함께 나노미터에서 마이크로미터 규모에 이르는 공극 크기 분포를 산정하였다.

MICP 시험에서 직접 측정되는 모세관압은 공기-수은 계에 대한 값이므로, 이를 실제 지중저장 환경에서의 CO<sub>2</sub>-염수 및 석유-염수 계 모세관압으로 환산하는 과정이 필요하다. 이러한 유체계 환산은 Young-Laplace 관계식에서 모

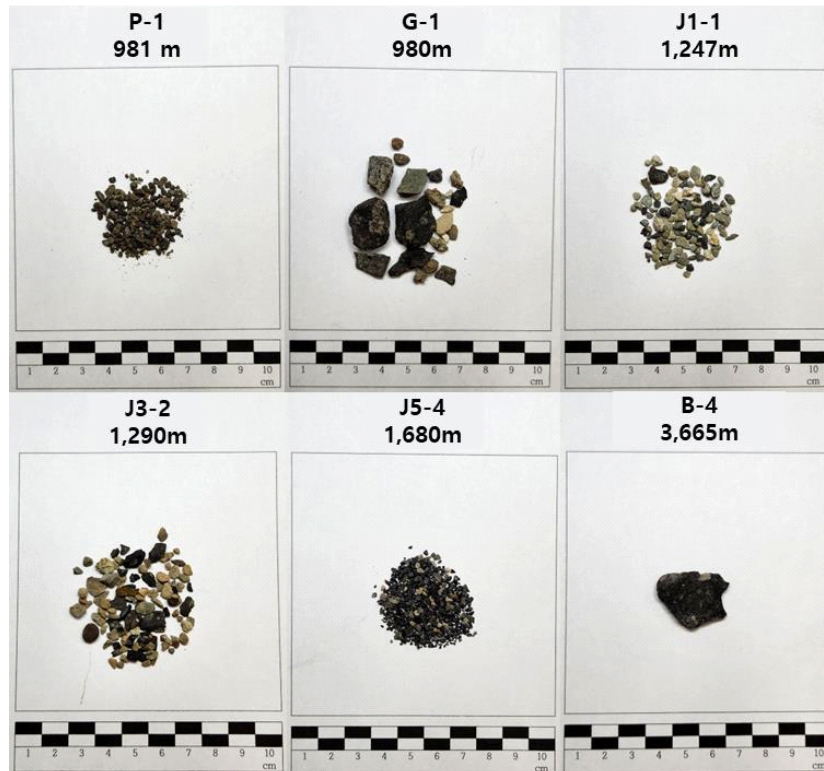


Fig. 2. Drilling cuttings from drilling wells in the South Sea Continental Shelf.

세관압이 계면장력과 접촉각의 곱에 비례한다는 점을 이용하여 수행하였으며, 공기-수는 계에서 얻어진 모세관압을 저장층 조건에 맞는 모세관압으로 변환하는 식(Schowalter, 1979; Daniel and Kaldi, 2009)이 제시된다(식 2).

$$P_{c,brine/CO_2} = P_{c,air/Hg} \frac{\sigma_{brine/CO_2} \cos \theta_{brine/CO_2}}{\sigma_{brine/Hg} \cos \theta_{brine/Hg}} \quad (2)$$

여기서  $P_{c,brine/CO_2}$ 는 CO<sub>2</sub>-염수 계의 모세관압,  $P_{c,air/Hg}$ 는 공기-수는 계에서 측정된 모세관압을 의미하며,  $\sigma$ 는 계면장력(dyne/cm)과  $\theta$ 는 접촉각(Degree)은 해당 유체의 물성과 습윤성을 반영한다.

도출된 모세관압-수는 포화도 곡선은 덮개암의 모세관 특성을 산정하는 데 활용하였다(Washburn, 1921). 먼저 수은이 공극목에 처음 진입하는 시점의 압력을 공극진입압력(pore-entry pressure,  $P_c$ )으로 정의하였으며, 이는 비습윤상 유체가 덮개암을 진입하기 위한 최소 모세관압에 해당한다. 수은 포화도 10% 지점의 모세관압을 유동압력(displacement pressure,  $P_d$ )(Schowalter, 1979)으로 산정하여 비습윤상 유체가 정체 상태에서 연속 유동으로 전환되는 임계 조건으로 평가하였다. 또한, 수은이 공극 내에서 연속적인 흐름을 형성하여 시료를 관통하게 되는 임계 압력은 수은주입 곡선의 2차 변곡점, 즉 기울기가 급격히 변화하는 지점으로부터 돌파압력(breakthrough pressure,  $P_b$ )으로 정의하였다. 이는 덮개암의 기밀성을 평가하는 핵심 지표로서 돌파압력이 높을수록 CO<sub>2</sub> 누출 위험이 낮다. 시추공 완판시료별로 산정한 공극진입압력( $P_c$ ), 유동압력( $P_d$ ), 돌파압력( $P_b$ )을 바탕으로 덮개암이 지탱할 수 있는 CO<sub>2</sub> 및 석유 최대 허용 기둥 높이 식 3을 산정하였다.

$$H_{CO_2(oil)} = \frac{P_{CO_2/brine(oil/brine)}}{g(\rho_{brine} - \rho_{CO_2(oil)})} \quad (3)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $\rho_{brine}$ ,  $\rho_{CO_2}$ 는 각각 염수와 CO<sub>2</sub>의 밀도( $kg/m^3$ )이다. 공기와 수은이 주입 유체로 적용되는 수은주입 모세관압 시험의 측정결과를 CO<sub>2</sub>와 염수, 석유와 염수의 관계로 변환하는 과정이 필요하다(Schowalter, 1979; Watts, 1987; Daniel and Kaldi, 2009). 이를 위해 CO<sub>2</sub>-염수 및 석유-염수 계 각각에 접촉각과 계면장력 값을 적용하고, CO<sub>2</sub> 및 석유와 염수간의 밀도 차이를 고려하여 모세관압의 기둥 높이(그림 3)로 환산하였다(Wiprut and Zoback, 2002; Lu *et al.*, 2011). 이렇게 산정된 모세관압 기반 CO<sub>2</sub> 및 석유 기둥 높이는 시료별, 시추공별 덮개암 기밀성을 나타내는 정량적 지표로 사용하여, 시추공 간 비교 및 시추공별 덮개암 기밀성 평가에 활용하였다. 또한, 공극 크기 분포를 통해 덮개암의 미세 공극 구조, 균질성 및 변형 특성 평가에 활용하였다. CO<sub>2</sub> 이동경로 및 누출경로 분석에 필수적이고 실제 수은이 침투한 공극 용적에 해당하는 유효공극률을 산정하였다. 또한, CO<sub>2</sub> 주입 시 압력 제한치 설정에 영향을 미치는 특정 공극크기 범위를 확인하였다. 이는 나노 공극 비율이 높을수록 모세관압이 증가하여 밀폐성이 우수함을 보여준다.

표 2는 공기-수는 계에서 측정된 MICP 결과를 저장층 조건의 CO<sub>2</sub>-염수 계 모세관압 및 CO<sub>2</sub> 기둥 높이로 환산하기 위해 사용한 물성값을 정리한 것이다. Young-Laplace 관계식 적용에 필요한 공기-수는 계의 계면장력  $\sigma_{air/Hg}$  과 접촉각  $\theta_{air/Hg}$ , CO<sub>2</sub>-염수 계의 계면장력  $\sigma_{brine/CO_2}$  과 접촉각  $\theta_{brine/CO_2}$ , 그리고 기둥 높이 산정에 사용된 염수 밀도  $\rho_b$  및 CO<sub>2</sub> 밀도  $\rho_{CO_2}$ 를 제시한다.

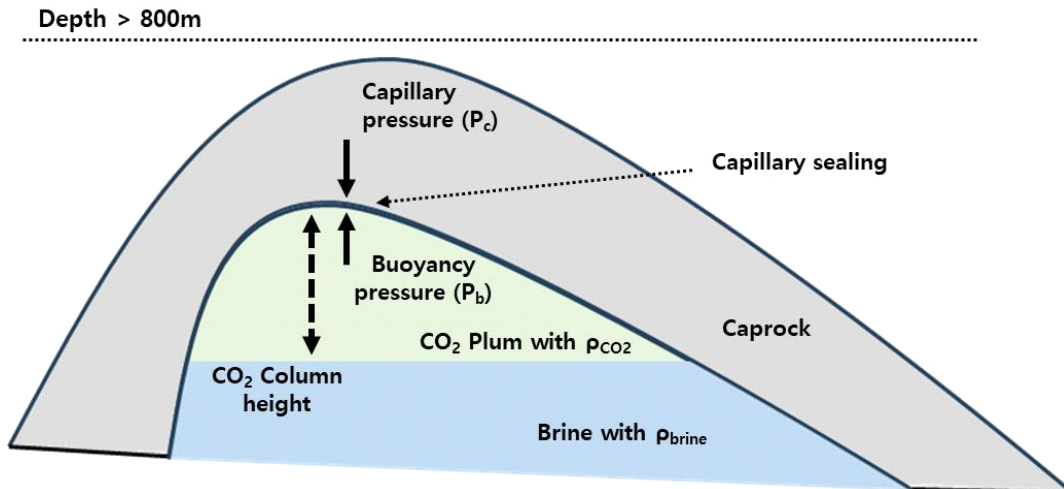


Fig. 3. Capillary sealing of the caprock above the CO<sub>2</sub> reservoir.

**Table 2.** Properties used for calculating the allowable CO<sub>2</sub> column height.

Parameter	$\sigma_{brine/CO_2}$	$\sigma_{air/Hg}$	$\theta_{brine/CO_2}$	$\theta_{air/Hg}$	$\rho_b$	$\rho_{CO_2}$
Value	26	485	0~60	130	1.05	0.65
Unit	dyne/cm	dyne/cm	Degree	Degree	g/cm <sub>3</sub>	g/cm <sub>3</sub>

$\theta_{brine/CO_2}$ 은 심도 증가에 따른 압력·온도 변화 및 CO<sub>2</sub> 농도 변화에 따라 덮개암의 습윤성이 강한 물 습윤(water-wet) 상태에서 중성 또는 부분적인 CO<sub>2</sub> 습윤 상태로 전이될 수 있다는 점을 고려하여 단일 값이 아닌 0°~60° 범위로 설정하였다(Arif *et al.*, 2016). 따라서 본 연구에서는 표 2의 물성값을 기초로 하되,  $\theta_{brine/CO_2}$ 을 0°~60° 범위에서 변화시키며 민감도 분석을 수행함으로써, 심도 및 암석 표면 조건에 따른 습윤성 변화가 모세관압과 CO<sub>2</sub> 최대 허용 기동 높이에 미치는 영향을 함께 평가하였다.

## 4. 분석 결과

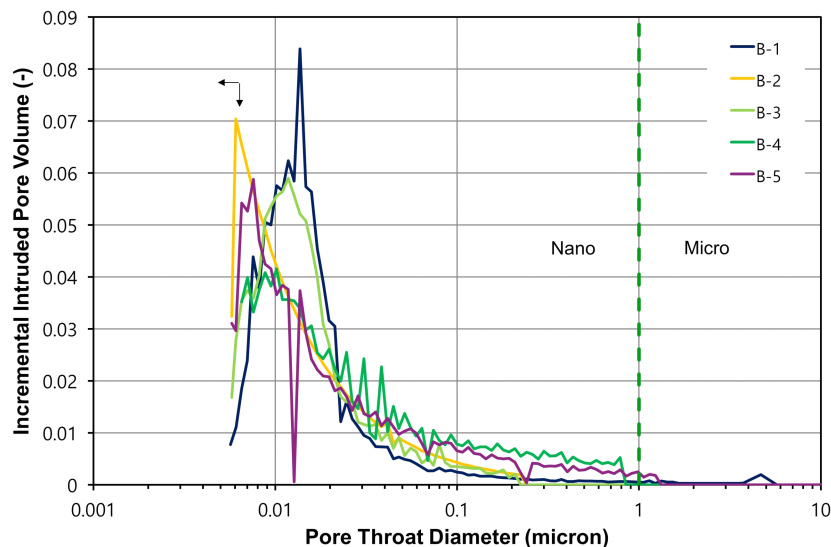
### 4.1. 공극사이즈 분포

B 시추공의 B-1 시료는 공극 크기 분포가 약 0.005~0.1  $\mu\text{m}$  범위에 집중된 단일 최고점 형태를 보이며, 특히 약 0.015  $\mu\text{m}$  부근에서 뚜렷한 최대값이 나타난다(그림 4). 이는 총 공극 부피가 나노 스케일 공극에 의해 지배되면서도 공극 크기가 비교적 좁은 범위에 집중된, 균질한 세립질 덮개암의 전형적인 특성으로 해석된다. 마이크로미터 규모의 공극은 부피가 매우 작고, 유효 공극 대부분이 미세 공극으로 구성되어 높은 기밀성을 갖는 대표적인 덮개암 공극 구조이다.

B 시추공의 B-2, B-3, B-4, B-5 시료 역시 나노 공극 우

세라는 점에서는 B-1과 동일하나, 최고점 위치와 분포 폭, 보조 최고점 유무에서 차이를 보인다(그림 4). B-2와 B-3은 0.005~0.1  $\mu\text{m}$  구간에서 단일 최고점이 형성되지만, 최대값이 약 0.007~0.01  $\mu\text{m}$ 로 다소 더 미세한 쪽으로 이동하고 최고점 폭이 넓어져, 주 공극 크기는 비슷하나 공극 크기 스펙트럼이 더 넓게 분포하는 경향을 보인다. B-4와 B-5 시료 역시 주 최고점은 0.01  $\mu\text{m}$  전후의 나노 공극 구간에 형성되며, 이후 공극 직경이 커질수록 공극 부피가 점차 감소하는 단일 최고점 분포를 보인다. B-4, B-5 시료는 나노 공극이 지배적이지만, B-1, B-2, B-3에 비해 공극 크기 분포가 다소 넓어지고, 공극 구조의 균질성이 약간 감소한 양상을 보인다. B 시추공 시료는 다른 시추공 시료에 비해 깊은 심도(2,480~3,685 m)에서 취득되어 공극 구조가 상대적으로 치밀한 경향을 보인다.

P 시추공의 P-1, P-2 시료와 G-1 시료는 나노 및 마이크로 공극이 함께 발달한 다중 스케일 공극 구조가 두드러진다. 대표적으로 P-1 시료의 공극 분포(그림 5)는 0.01  $\mu\text{m}$  부근의 나노 공극 최고점과 1~3  $\mu\text{m}$  범위의 마이크로 공극 최고점이 동시에 발달한 이중 최고점 형태를 나타내며, 두 최고점이 상대적으로 분리되어 나노 공극과 마이크로 공극이 서로 다른 군집으로 존재하는 것으로 해석된다. P-2는 0.01~5  $\mu\text{m}$  구간 전체에 걸쳐 비교적 완만하고 연속적인 곡선을 보이며, 다양한 크기의 공극이 하나의 연속적인 공

**Fig. 4.** Pore size distribution of sample B-1, B-2, B-3, B-4, and B-5.

극 네트워크로 연결된 구조적 복잡성을 나타낸다. G-1 시료는 약 0.01~5  $\mu\text{m}$  전 범위에서 공극 부피가 폭넓게 분포하고, 특히 0.003~0.004  $\mu\text{m}$  부근의 나노 공극에서 가장 높은 기여도를 보인다. 동시에 0.5~2  $\mu\text{m}$  구간의 마이크로 공극도 상당한 비중을 차지하여, P 시추공 시료와 더불어 나노-마이크로 공극이 공존하는 공극 구조로 평가된다.

J 시추공의 시료는 모두 1  $\mu\text{m}$  이하 나노 공극이 지배적이라는 공통 특성을 보이지만, 개별 시료의 공극 크기 분포 형상은 뚜렷한 차이를 나타낸다. J1-1 시료의 분포(그림 5)는 0.02  $\mu\text{m}$ 와 0.2  $\mu\text{m}$  부근에서 이중 최고점을 보이고, 나노 및 마이크로 영역에 걸친 복합 공극 구조를 보여준다. J3-2는 0.007~0.01  $\mu\text{m}$ 에서 주 최고점이 형성되고 4~5  $\mu\text{m}$  구간에서 작은 보조 최고점이 동반되어, 나노 공극을 중심으로 일부 마이크로 공극이 혼재된 구조를 갖는다. J3-3은

약 0.007~0.03  $\mu\text{m}$ 에서 최고점을 보인 뒤 4  $\mu\text{m}$ 에서 공극 부피가 급격히 감소하여, J 시추공 시료 중 공극 크기 분포가 가장 균질하고 단일 크기에 집중된 시료로 해석된다. 반대로 J5-4는 0.003~5  $\mu\text{m}$ 에 이르는 가장 넓은 분포 범위를 보이며, 나노 및 마이크로 영역에서 여러 개의 최고점이 중첩되어 공극 구조의 불균질성과 복잡성이 가장 큰 시료로 평가된다.

#### 4.2. 모세관압 분석

모세관압 분석에서 측정 초기에 증분 단계별 추가 수은 침투 부피(incremental intrusion)의 값은 매우 크게 나타난다(그림 6). 이 부분은 정합(conformance) 과정으로 측정 초기 낮은 모세관압으로 불균질한 표면 굴곡과 균열을 채우는 과정으로 실제 기공이 아니라 수은에 의해 밀린 시료

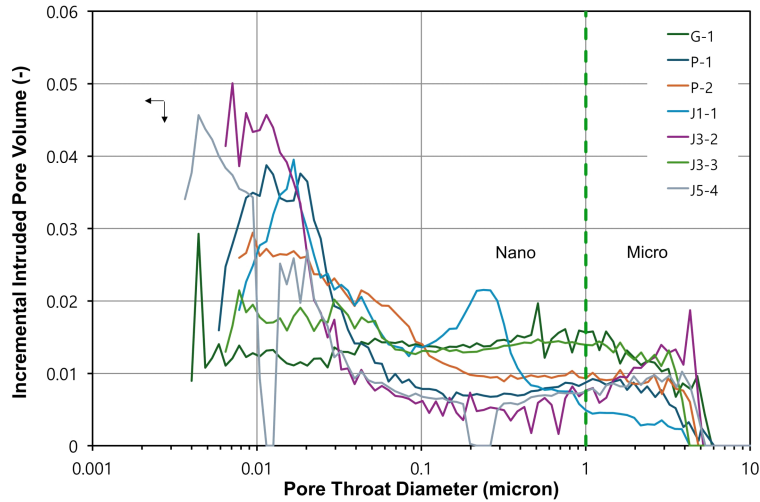


Fig. 5. Pore size distribution of sample.

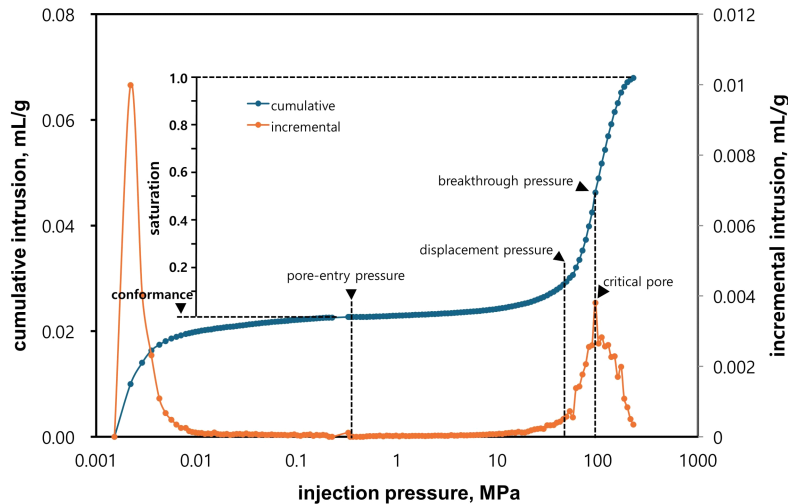


Fig. 6. Mercury intrusion curves before data conformance fitting of B-1 sample.

들이 응집되는 구간으로 판단하여 모든 시료의 정합 구간은 분석에서 제외한다(Kim *et al.*, 2020).

그림 7의 B-1 수은주입 모세관압 수는 포화도 곡선을 보면, 정합 구간 이후 모세관압 증가에 따라 수는 포화도가 비교적 완만하게 증가하는 전형적인 세립질 뒷개암의 양상을 보인다. 공극진입압력( $P_c$ )은 약 0.3 MPa로 산정되어, 표면에 상대적으로 큰 입구 공극이 일부 존재함을 시사한다. 그러나 수는 포화도 10% 지점에 해당하는 유동압력( $P_d$ )은 약 36 MPa, 시료를 관통하는 돌파압력( $P_b$ )은 약 95 MPa로 나타나, 시료 내부에는 미세 공극으로 이루어진 공극 구조가 잘 발달해 있음을 보여준다. 따라서 B-1 시료는 초기 수는 유입에 대한 민감도는 다소 낮지만, 내부 미세 공극의 영향으로 전체 층을 통한 장기적인 유체 누출을 일정 수준 이상 효과적으로 제어할 수 있는 전형적인 뒷개암 모세관 특성을 나타내는 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2020).

B 시추공의 B-2, B-3, B-4, B-5 시료는 심도 증가에 따라 모세관압 특성이 점진적으로 변화하는 경향을 보인다. B-2

와 B-3 시료는 공극진입압력이 약 6 MPa로 증가하고 돌파압력도 약 110 MPa 수준으로 초기 진입 단계에서 미세 공극이 우세하나, 시료 전체를 관통하는 임계 공극 구조는 B-1과 유사한 수준임을 의미한다. B-4 시료는 공극진입압력이 약 2 MPa로 낮으면서도 돌파압력이 약 127 MPa로 증가하고, 최심부 시료인 B-5는 공극진입압력이 약 1 MPa, 돌파압력이 약 171 MPa로 가장 높은 값을 보여, 심도 증가에 따라 공극 구조가 전반적으로 더욱 치밀해지고 장기적인 모세관 차단 능력이 향상되는 경향을 나타낸다.

P-1, P-2 시료와 G 시추공의 G-1 시료는 공극진입 단계에서는 B 시추공 시료와 유사하나, 돌파 단계에서 봉쇄 특성 차이가 뚜렷하다. P-1과 P-2는 공극진입압력 약 0.2 MPa, 0.3 MPa, 돌파압력 약 109 MPa, 132 MPa로 동일 시추공 내에서도 심도 증가에 따라 장기 기밀성이 향상되는 경향을 보인다. G-1은 공극진입압력 약 0.2 MPa, 돌파압력 약 283 MPa로 전체 시료 중 가장 높은 값을 보여 장기 봉쇄에 가장 유리한 뒷개암으로 평가된다(그림 8).

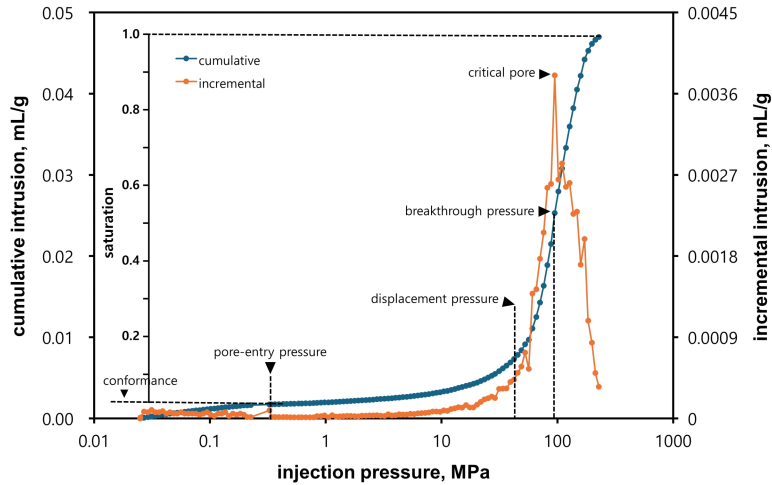


Fig. 7. Mercury intrusion curves after data conformance fitting of B-1 sample.

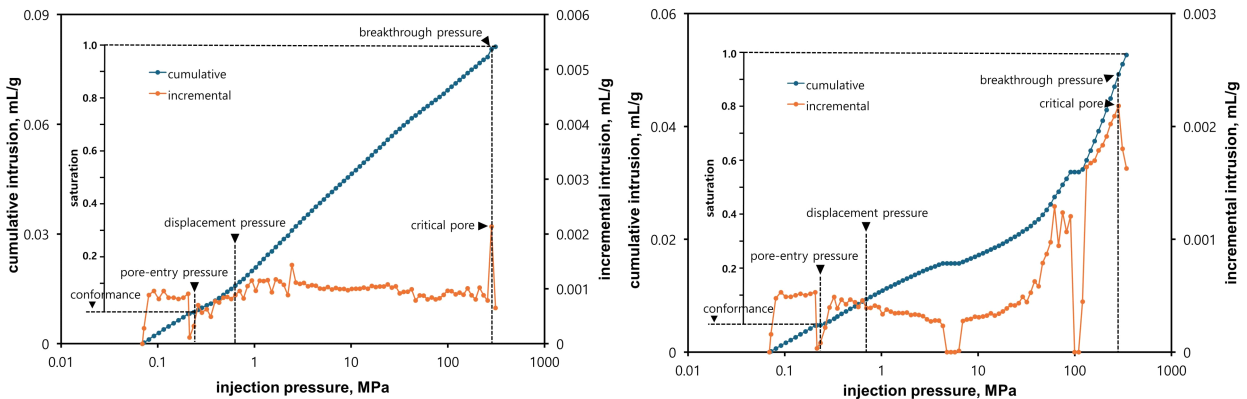


Fig. 8. Mercury intrusion curves after data conformance fitting of G-1 and J5-4 samples.

**Table 3.** Results of mercury injection capillary pressure (MICP) test on all 12 samples.

Block	VI-2					V	IV		JDZ			
Borehole	B					G	P		J1	J3	J5	
sample name	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	G-1	P-1	P-2	J1-1	J3-2	J3-3	J5-4
Depth (m)	2,480- 2,490	2,740- 2,745	2,755- 2,760	3,665- 3,670	3,680- 3,685	980	981	997	1,247	1,290	1,570	1,680
Sample weight (g)	1.536	1.737	1.438	1.583	1.573	0.812	2.014	2.293	1.490	1.089	2.345	1.431
Total intrusion volume (mL/g)	0.047	0.028	0.024	0.010	0.014	0.087	0.070	0.058	0.064	0.050	0.071	0.059
Median pore diameter (nm)	13.63	14.97	13.56	21.05	16.74	160.91	20.08	34.55	36.52	15.44	67.46	16.64
Critical pore diameter (nm)	13.66	11.78	11.78	10.17	7.57	4.41	11.42	9.44	16.71	7.09	7.80	4.41
Conformance (mL/g)	0.0016	0.0030	0.0021	0.0013	0.0016	0.0086	0.0033	0.0025	0.0024	0.0061	0.0058	0.0048
Porosity (%)	10.85	6.57	5.93	2.41	3.42	12.25	18.72	13.50	14.43	7.83	12.27	22.14
(Conformance corrected) Porosity (%)	10.48	5.78	5.34	1.97	3.02	10.23	11.91	10.28	12.11	4.80	8.97	6.73
Air permeability (mD)	0.05	0.02	0.03	0.16	0.11	9.00	3.64	5.08	0.98	11.05	7.64	6.23
Entry Pressure, Pe (MPa)	0.3	6	6	2	1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2
Displacement pressure, Pd (MPa)	36	27	31	6	9	0.6	1	0.8	2	0.5	0.7	0.7
Breakthrough pressure, Pb (MPa)	95	110	110	127	171	283	109	132	75	176	160	283

J 시추공의 J1-1, J3-2, J3-3, J5-4 시료는 모두 나노 스케일 공극이 우세한 덮개암이지만 모세관압 특성은 시료별로 상이하다. J1-1 시료는 공극진입압력 약 0.3 MPa, 돌파압력 약 75 MPa로 장기 기밀성이 상대적으로 낮은 시료로 해석되며, J3-2와 J3-3 시료는 공극진입압력 약 0.2 MPa, 0.3 MPa, 돌파압력 약 176 MPa, 160 MPa 수준으로 중간 정도의 봉쇄 특성을 보인다. J5-4 시료는 공극진입압력 약 0.2 MPa, 돌파압력 약 283 MPa로 G-1과 유사한 최고 수준의 모세관압 특성을 나타내 JDZ 광구 내에서 가장 우수한 모세관 봉쇄 능력을 갖는 덮개암 구간으로 평가된다(그림 8).

수은주입 모세관압 시험은 공극 구조뿐 아니라 투과도 산정에도 활용하였다(표 3). 암석의 투과도는 내부 공극 크기 분포와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있으며(Garcia et al., 2009), 모세관 수은 압입 시험 결과는 아래 제시된 식을 이용하여 투과도를 산정하는 데 활용될 수 있다.

$$k_{air} = a \left( \frac{S_{Hg}}{P_{c,air/Hg}} \right)^c \quad (4)$$

식 (4)는 탄산염암 및 사암 시료에 대한 투과도 실험 결과를 회귀 분석하여 제안된 경험식으로, 세일과 같이 투과도가 극히 낮은 암석에 적용할 경우, 투과도가 다소 과대 산

정되는 경향이 있는 것으로 보고되었다. a는 339의 값을 갖는 상수이며,  $(S_{Hg}/P_{c,air/Hg})_{max}$ 는 각 단계별 모세관압에 대응하는 수은 포화도 비의 최대값(%/psi)을 의미한다. 지수 c는 1.691로 설정한다(Lohr and Hackley, 2018).

12개 시료의 공극 구조와 모세관 특성은 매우 이질적인 양상을 보이며, 이에 따라 시추공 시료별 덮개암 기밀성 역시 크게 달라진다. 공기 투과도는 대부분 1 mD 이하의 매우 낮은 값에 속하지만, J3-2와 G-1 시료는 각각 약 11.05 mD, 9.00 mD로 상대적으로 높은 값이 산정되어, 일부 구간에서보다 발달된 유동 경로가 존재함을 시사한다. 각 시료에서 분석된 투과도 차이는 모세관압에 대응하는 수은 포화도 비의 최대값과 공극 크기 분포에 기인하며, 특히 세립질 덮개암 내에 협재된 상대적으로 조립한 층이나 미세 균열 발달 여부가 중요한 요소로 작용한 것으로 해석된다.

J5-4 시료는 낮은 투과도와 높은 돌파압력이 동반되는 전형적인 고기밀 덮개암인 반면, G-1 시료는 상대적으로 높은 투과도에도 불구하고 돌파압력이 크게 산정되어 평균 유동성은 크더라도 모세관 차단 능력은 충분히 확보된 것으로 해석된다. 따라서 덮개암 봉쇄능 평가는 투과도 하나의 값만으로는 한계가 있으며, 공극진입압력, 유동압력, 돌파압력 등 모세관압 특성과 함께 CO<sub>2</sub> 저장소 설계와 장기 누출 위험을 평가할 필요가 있다.

### 4.3. 수은 포화도에 따른 자유수면 높이

수은주입 모세관압(MICP) 시험 자료를 CO<sub>2</sub>-염수 계 조건으로 환산하고 자유수면(FWL: Free Water Level)을 기준으로 FWL-수포화도 곡선으로 재해석하였으며, 이때 FWL-수포화도 곡선은 접촉각 0°, 20°, 40°, 60°를 기준으로 분석하였다(Daniel and Kaldi, 2009; Lohr and Hackley, 2018). B 시추공 B-1 시료는 접촉각 0° 조건에서 최대 허용 CO<sub>2</sub> 기둥 높이는 약 2,015 m로 산정되었다. FWL-수포화도 곡선은 낮은 모세관압 구간에서 급격한 수포화도 감소를 보인다. 일정 압력 이상에서는 완만한 감소 양상을 나타내는데, 이는 초기 부력 증가에 대해 상대적으로 민감하게 반응하고, 일정 수준 이상에서는 미세 공극이 차단 역할을 수행함을 의미한다(그림 9).

같은 B 시추공의 B-2, B-3, B-4, B-5 시료에 대해 동일한 방법으로 FWL-수포화도 해석을 수행한 결과, 심도가 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 최대 허용 기둥 높이가 전반적으로 증가하는 경향이 확인되었다(IEAGHG, 2024). 접촉각 0° 기준으로 B-2와 B-3 시료는 각각 약 2,336 m로 B-1보다 다소 높은 값을 보이며, B-4 시료는 약 2,706 m, B-5는 약 3,636 m의 CO<sub>2</sub> 기둥을 지지할 수 있는 것으로 평가된다. CO<sub>2</sub> 최대 허용 기둥 높이가 클수록 더 많은 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있다. 또한, 심도가 깊어질수록 공극 구조가 점차 치밀해지고 모세관압이 상승하여, 동일 시추공 내에서도 상부 뿔

개암보다 심부 뿔개암이 장기 CO<sub>2</sub> 봉쇄에 더 유리한 조건을 가지므로 B 시추공에서 B-5 시료가 가장 우수한 봉쇄 능력을 보여준다.

P 시추공의 P-1, P-2 시료와 G 시추공의 G-1 시료에 대해서도 동일한 FWL-수포화도 기반 해석을 수행하였다. P-1 시료의 최대 허용 CO<sub>2</sub> 기둥 높이는 약 2,321 m, P-2 시료는 약 2,807 m로 산정되어, 중간 수준 뿔개암 범위에 속한다. 이에 비해 G-1 시료는 약 6,012 m에 이르는 매우 높은 CO<sub>2</sub> 최대 허용 기둥 높이를 나타내며(그림 9), FWL-수포화도 곡선에서도 넓은 높이 범위에 걸쳐 수포화도 변화가 제한되고 높은 모세관압 조건에서 CO<sub>2</sub> 기둥을 안정적으로 지지하는 특성이 뚜렷하게 나타난다. 이는 MICP 분석에서도 출된 최고 수준의 돌파압력 결과와 일관되며, 남해대륙붕 뿔개암 중 가장 우수한 봉쇄 구간에 해당하는 시료로 평가된다.

J 시추공의 J1-1, J3-2, J3-3, J5-4 시료에 대해 산정된 FWL-수포화도 기반 CO<sub>2</sub> 최대 허용 기둥 높이는 약 1,586~6,012 m 범위에 분포하며, 시추공 및 심도에 따른 봉쇄능의 시료 간 차이가 두드러진다. J1-1 시료는 약 1,586 m로 전체 시료 중 가장 낮은 CO<sub>2</sub> 기둥 높이를 보이며, B-1 시료보다도 낮은 수준의 기밀성을 갖는 취약 구간으로 해석된다. J3-2와 J3-3 시료는 각각 약 3,738 m와 3,398 m로 B-5나 P-2와 유사하거나 다소 높은 수준의 봉쇄 특성을 나타내며, 심부

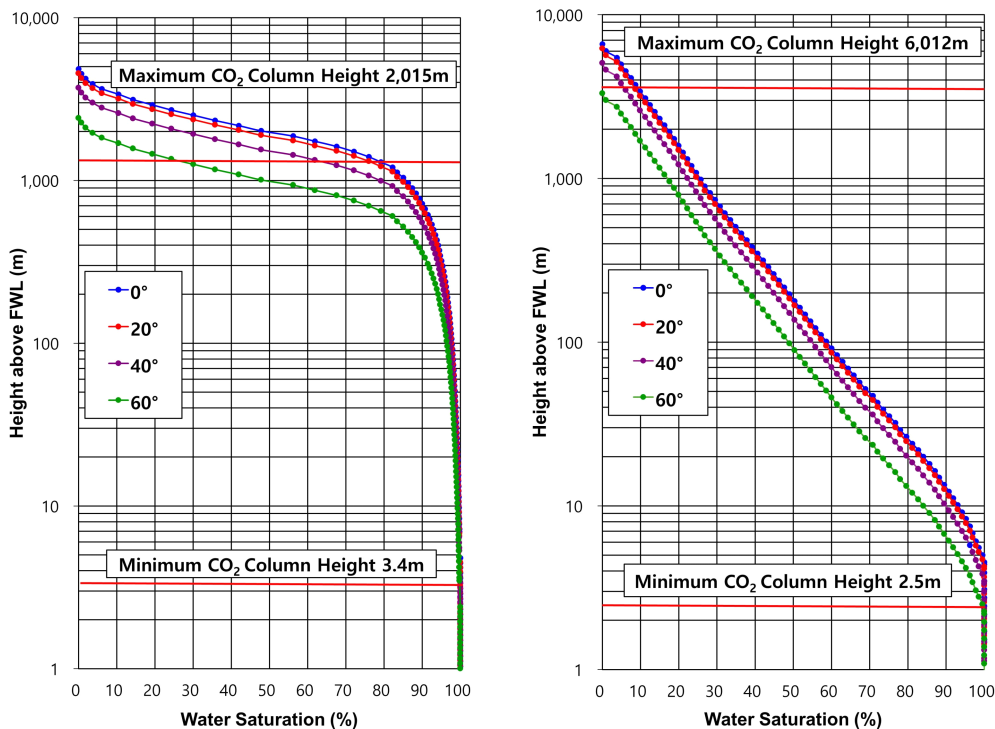


Fig. 9. Plots of the water (brine) saturation (wetting saturation) versus height above free water level (FWL) of B-1 and G-1 drilling wells. Contact angle sensitivities from 0° to 60°.

로 갈수록 덮개암의 봉쇄능이 강화되는 경향을 뚜렷이 보여준다. J5-4 시료는 G-1과 마찬가지로 약 6,012 m에 이르는 최대 CO<sub>2</sub> 기동 높이를 나타내어 J 시추공 내에서 가장 우수한 덮개암 구간으로 평가된다.

남해대륙붕 덮개암 시료들의 최대 허용 CO<sub>2</sub> 기동 높이는 약 1,586~6,012 m 범위로 나타나 시추공 심도에 따른 봉쇄 능력의 이질성이 뚜렷하게 확인된다. G-1과 J5-4 시료는 가장 큰 CO<sub>2</sub> 기동 높이를 보여 CO<sub>2</sub> 지중저장 측면에서 우수한 봉쇄 잠재력을 갖는 구간으로 해석된다. 이러한 FWL-수포화도 기반 해석 결과는 남해대륙붕 덮개암의 시추공 심도별 기밀성을 정량적으로 비교 및 평가하는 데 중요한 근거를 제공한다.

## 5. 시추공별 덮개암 기밀성 비교

### 5.1. CO<sub>2</sub> 최대 허용 기동 높이

6개 시추공에서 확보한 12개 암편 시료를 대상으로 CO<sub>2</sub> 기동 높이와 FWL-수포화도 해석 결과를 통해 접촉각 0° 기준으로 CO<sub>2</sub> 최대 허용 기동 높이를 비교하였다. CO<sub>2</sub> 기동 높이 산정의 기준이 되는 압력 조건을 공극진입압력(P<sub>c</sub>), 유동압력(P<sub>d</sub>), 돌파압력(P<sub>b</sub>) 단계별로 적용하여 분석을 수행한 결과, 모든 시료에서 기준 압력이 공극진입압력에서 돌파압력으로 변화함에 따라 CO<sub>2</sub> 기동 높이가 급격히 증가하는 일관된 경향이 확인되었다(IEAGHG, 2024). 공극진입압력은 낮은 높이가 산정되나, 돌파압력은 덮개암이 물리적으로 지지 가능한 최대 CO<sub>2</sub> 기동 높이는 크게 상승하는 특성을 반영한다. 그러나 동일한 압력 조건 내에서도 시

료별 CO<sub>2</sub> 최대 기동 높이는 크게 달랐으며, 이는 공극 구조, 임계 공극 크기, 모세관 저항, 공극 연결성 및 투과도 등 여러 요인 차이가 지배적으로 작용한 결과로 해석된다(Daniel and Kaldi, 2009; Lohr and Hackley, 2018).

공극진입압력 조건에서 산정된 CO<sub>2</sub> 기동 높이는 약 5~123 m에 분포한다. B 시추공 중 B-2와 B-3 시료는 약 123 m로 공극진입압력 조건에서 높은 CO<sub>2</sub> 기동 높이가 산정되어, CO<sub>2</sub>가 공극목에 도달하기까지 비교적 높은 초기 압력이 요구되는 것으로 해석된다. 반면 B-1을 포함한 나머지 시료들은 대체로 5~32 m 내외의 낮은 기동 높이를 보이며, 덮개암 상부에 CO<sub>2</sub>가 처음 도달하는 단계에서는 작은 압력 변화에도 부분적인 공극 침투가 발생할 수 있음을 시사한다. 공극진입압력 조건에서 시료 간 초기 유입 민감도의 차이를 드러내지만, 장기 저장 안정성을 좌우하는 것은 이후 돌파압력 조건에서 요구되는 모세관 특성임을 함께 시사한다.

돌파압력 조건에서 산정된 CO<sub>2</sub> 기동 높이는 시료에 따라 약 1,586~6,012 m 범위에서 분포하며, 심도가 깊다고 해서 더 큰 CO<sub>2</sub> 기동 높이가 나타나는 것은 아니었다(그림 10). B 시추공의 경우 B-1에서 B-5로 심도가 증가함에 따라 돌파압력 기준 CO<sub>2</sub> 기동 높이가 2,016 m에서 3,636 m로 점진적으로 증가하는 비교적 규칙적인 경향을 보였으나, J3 시추공에서는 심도와 CO<sub>2</sub> 기동 높이의 관계가 비례하지 않는 비선형적인 양상이 나타났다. 이는 J3 시추공에서는 압밀에 따른 심도 효과보다 층서 내 미세 불균질성, 공극연결성 변화, 광물조성 차이 등이 더 큰 영향을 보여준다.

시료별 상대적인 덮개암 기밀성을 평가한 결과, G-1과 J5-4

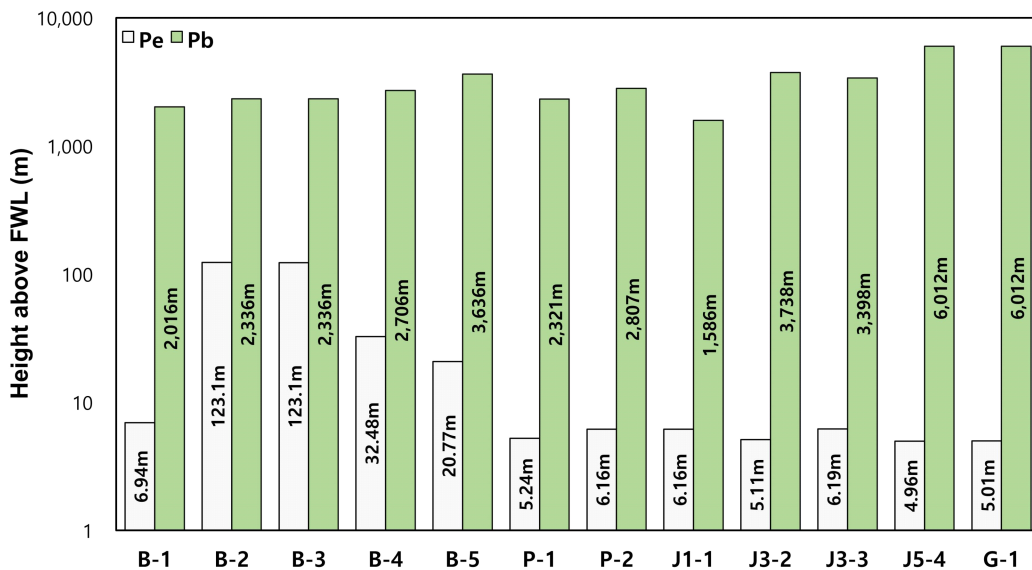


Fig. 10. CO<sub>2</sub> retention heights for the samples from drilling wells. Capillary pressure sensitivities for pore entry pressure (P<sub>e</sub>) and breakthrough pressure (P<sub>b</sub>).

시료는 돌파압력 조건에서 최대 약 6,012 m에 달하는 기동 높이를 기록하여 가장 우수한 덮개암 봉쇄 특성을 나타냈다. 반면, J1-1 시료는 돌파압력 기준 CO<sub>2</sub> 기동 높이가 약 1,586 m에 상대적으로 낮은 저장 잠재력을 보였으며, 이는 남해대륙붕 내에서 잠재적인 누출 취약 구간이 될 수 있음을 의미한다.

5.2. 석유 최대 허용 기동 높이

전체 12개 압편 시료를 대상으로 석유-염수 계의 접촉각인 45°를 적용하여 공극진입압력, 유동압력, 돌파압력에 따른 석유 최대 허용 기동 높이를 산정하였다. 해석 결과, 모세관압 단계에 따라 기동 높이가 뚜렷하게 구분되는 경향을 보였으며, 공극진입압력 조건에서는 약 6~174 m, 돌파압력 조건에서는 약 2,157~8,175 m 범위까지 확장되는 단계적 증가가 확인되었다(그림 11). 이는 동일한 덮개암 공극 구조를 가지더라도 모세관 저항이 유체 진입 단계보다 시료 전체를 관통하는 돌파 단계에서 훨씬 크게 작용함을 보여주며, 각기 다른 모세관압에 대응하는 석유 기동 높이가 기밀성의 서로 다른 측면을 반영하고 있음을 나타낸다.

석유-염수 계에서 산정된 석유 기동 높이는 동일 시료의 CO<sub>2</sub> 기동 높이와 비교했을 때 돌파압력 기준에서 전반적으로 더 높은 값을 보였다. 돌파압력 조건에서 석유 최대 허용 기동 높이는 약 2,157~8,175 m로 평가되며, 이는 같은 공극 구조를 가정한 CO<sub>2</sub> 기동 높이보다 상대적으로 큰 값이다. 이러한 차이는 석유-염수 계에서 석유의 낮은 밀도와 염수의 상대적으로 높은 밀도 차이가 더 큰 부력 차이를 형성하기 때문으로, 동일한 덮개암이라도 유체의 밀도, 계면

장력, 접촉각에 따라 최대 허용 기동 높이가 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 그림 11에 제시된 그래프는 각 시료에 대해 모세관압 조건별 석유 기동 높이를 한눈에 비교한 것으로, 모세관압 단계에 따른 기동 높이의 단계적 증가와 시료 간 편차를 시각적으로 잘 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 남해대륙붕 4개 광구 6개 시추공에서 확보된 덮개암 시추압편을 대상으로 수은주입 모세관압 시험을 통해 공극 구조 분석, 모세관압 수는 포화도 곡선, FWL-수포화도 해석을 수행하여, 덮개암을 구성하는 세립질 퇴적암의 공극 특성과 모세관 차단 능력을 규명하고 CO<sub>2</sub> 및 석유 허용 기동 높이에 기반한 수리지질학적 봉쇄능을 정량적으로 평가하고자 하였다.

남해대륙붕 덮개암 시료들은 전반적으로 1 μm 이하 나노 공극이 지배적인 공통된 공극 구조를 보이지만, 공극 크기 분포의 모양과 나노-마이크로 공극의 비율은 시추공 심도별로 크게 달라 고도의 공극 구조 이질성이 확인되었다.

MICP 시험 결과, 공극진입압력, 유동압력, 돌파압력은 시료별로 넓은 범위에 걸쳐 분포하였으며, 특히 덮개암 봉쇄능의 핵심 지표인 돌파압력은 75~283 MPa 범위로 나타나 동일 지역 내에서도 덮개암의 봉쇄 능력이 상당히 달라질 수 있음을 확인하였다. 모세관압 분석 결과를 통해 CO<sub>2</sub> 허용 기동 높이를 산정한 결과 G-1과 J5-4는 약 6,012 m 내외의 가장 큰 CO<sub>2</sub> 기동 높이를 기록하였으며, J1-1은 약 1,586 m 수준으로 가장 낮은 결과로 명확한 덮개암 봉쇄능

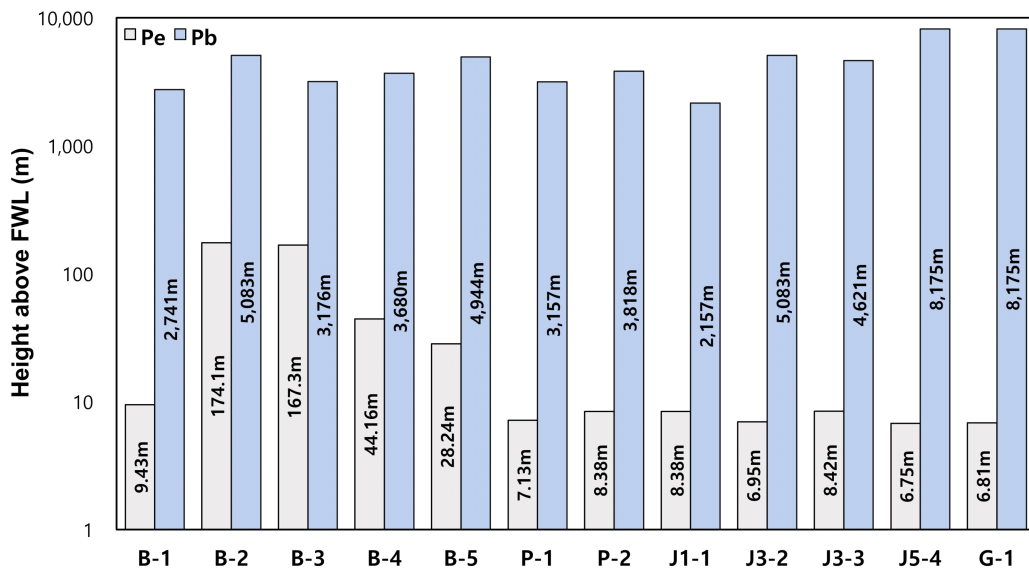


Fig. 11. Oil retention heights for the samples from drilling wells. Capillary pressure sensitivities for pore entry pressure (P<sub>e</sub>) and breakthrough pressure (P<sub>b</sub>).

의 차이를 보였다. 또한, 석유-염수 계에서 산정된 석유 최대 허용 기동 높이는 저류층 내 석유 분포와 포화도 해석을 위한 중요한 기준값을 제공한다. G-1과 J5-4는 약 8,175 m의 높은 석유 기동 높이를 보이는 반면, J1-1은 약 2,157 m로 낮은 석유 기동 높이를 나타내어 석유-가스 부존 측면에서 우수 덮개암과 취약 덮개암을 구분하는 지표로 활용될 수 있다.

종합적으로 남해대륙붕 지역의 덮개암은 전반적으로 CO<sub>2</sub> 지중저장을 고려할 수 있을 정도의 기밀성을 보유하고 있으며, 특히 G-1과 J5-4는 가장 우수한 봉쇄 특성을 나타낸다. 반면 J1-1과 B-1은 상대적으로 낮은 봉쇄 특성이 평가되어, 저장소 설계 시 구간별 성능 차이를 반영한 보수적인 주입압력 설정과 추가적인 덮개암 검증이 필요하다. 또한, 본 연구는 시추 과정에서 회수된 시추 압편 시료에 기반하고 있으므로, 향후 전체 코어를 활용한 장기 CO<sub>2</sub>-암석 반응 실험, 3차원 지구물리·지오메카닉 모델링 및 모니터링 설계와 연계한 후속 연구가 수행된다면 남해대륙붕 덮개암의 장기 저장 안정성을 보다 신뢰성 있게 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국석유공사 “남해대륙붕 종합기술평가”사업과 산업통상부 유전개발사업출자의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Arif, M., Al-Yaseri, A.Z., Barifcani, A., Lebedev, M. and Iglauer, S., 2016, Impact of pressure and temperature on CO<sub>2</sub>-brine-mica contact angles and CO<sub>2</sub>-brine interfacial tension: Implications for carbon geo-sequestration. *Journal of colloid and interface science*, 462, 208-215.
- Bjørlykke, K., 2010, *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics*. Springer.
- Busch, A., Alles, S., Gensterblum, Y., Prinz, D., Dewhurst, D.N., Raven, M.D., Stanjek, H. and Krooss, B.M., 2008, Carbon dioxide storage potential of shales. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2, 297-308.
- Daniel, R.F. and Kaldi, J.G., 2009, Evaluating seal capacity of cap rocks and intraformational barriers for CO<sub>2</sub> containment. *GeoScienceWorld*.
- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raen, A.M. and Risnes, R., 2008, *Petroleum Related Rock Mechanics (2nd Ed.)*. Elsevier.
- Garcia, X., Akanji, L.T., Blunt, M.J., Matthai, S.K. and Latham, J.P., 2009, Numerical study of the effects of particle shape and polydispersity on permeability. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 80, 021304.
- Gaus, I., 2010, Role and impact of CO<sub>2</sub>-rock interactions during CO<sub>2</sub> storage in sedimentary rocks. *International journal of greenhouse gas control*, 4, 73-89.
- Hangx, S.J. and Spiers, C.J., 2009, Reaction of plagioclase feldspars with CO<sub>2</sub> under hydrothermal conditions. *Chemical Geology*, 265, 88-98.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG), 2024, *Geological storage of CO<sub>2</sub>: Seal integrity review (Technical Report 2024-06)*.
- Katz, A.J. and Thompson, A.H., 1987, Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92, 599-607.
- Kim, S.O., Wang, S. and Lee, M., 2020, Evaluation of Hydrogeologic Seal Capacity of Mudstone in the Yeongil Group, Pohang Basin, Korea: Focusing on Mercury Intrusion Capillary Pressure Analysis. *Economic and Environmental Geology*, 53, 23-32 (in Korean with English abstract).
- Krevor, S., Blunt, M.J., Benson, S.M., Pentland, C.H., Reynolds, C., Al-Menhali, A. and 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.
- Laplace, P.-S., 1806, *Traité de mécanique céleste*, Tome IV. Paris: Courcier.
- Lohr, C.D. and Hackley, P.C., 2018, Using mercury injection pressure analyses to estimate sealing capacity of the Tuscaloosa marine shale in Mississippi, USA: Implications for carbon dioxide sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 78, 375-387.
- Lu, J., Milliken, K., Reed, R.M. and Hovorka, S., 2011, Diagenesis and sealing capacity of the middle Tuscaloosa mudstone at the Cranfield carbon dioxide injection site, Mississippi, USA. *Environmental Geosciences*, 18, 35-53.
- Schowalter, T., 1979, Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *AAPG Bulletin*, 63, 723-760.
- Song, J. and Zhang, D., 2013, Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration. *Environmental science & technology*, 47, 9-22.
- Washburn, E.W., 1921, The dynamics of capillary flow. *Physical review*, 17, 273.
- Watts, N.L., 1987, Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single-and two-phase hydrocarbon columns. *Marine and Petroleum Geology*, 4, 274-307.
- Wiprut, D. and Zoback, M.D., 2002, Fault reactivation, leakage potential, and hydrocarbon column heights in the northern north sea. *Norwegian Petroleum Society Special Elsevier*, 11, 203-219.
- Young, T., 1805, An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65-87.
- Zoback, M.D. and Gorelick, S.M., 2012, Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *PNAS*, 109, 10164-10168.