

계면활성제 활용에 따른 공극 규모 이산화탄소 저장 효율 향상

Enhancing Carbon Dioxide Storage Efficiency in Aquifers through Surfactant Application

강 석 구¹ Gang, Seokgu

정 중 원² Jung, Jongwon

Abstract

Underground carbon dioxide (CO₂) storage emerges as a pivotal strategy for mitigating atmospheric CO₂ emissions and addressing global warming concerns. This study investigates techniques to optimize storage efficiency in aquifers, which stand out for their superior capacity compared to other geological layers. The focus is on the application of nonionic and anionic surfactants to enhance CO₂ storage efficiency within confined spaces. A specialized micromodel facilitating fluid flow observation was employed for the evaluation. Experimental results revealed a noteworthy minimum 40% increase in storage efficiency at the lowest injection rate when utilizing nonionic and anionic surfactants, in comparison to pure water injection. Interestingly, no significant variations in storage efficiency were observed based on the ionicity and concentration of the surfactants under investigation. These findings have implications for guiding the selection and concentration determination of surfactants in future underground CO₂ storage endeavors.

요 지

지구 온난화를 유발하는 대기 중 이산화탄소 저감을 위한 해결책으로써 이산화탄소 지중 저장공법이 관심받고 있다. 지중에 이산화탄소를 저장하기 위한 방법으로는 대수층 또는 고갈된 원유층 주입 및 이산화탄소 주입을 통한 원유 회수 증진 등이 있다. 이중 대수층은 다른 저장층에 비해 큰 저장 용량을 가짐으로써, 활용성이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 하지만, 제한된 저장 공간에 최대한의 저장 효율을 달성하기 위한 기술이 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 비이온성 및 음이온성 계면활성제를 활용하여 이산화탄소의 저장 효율 향상 기술을 개발하고자 한다. 저장 효율 평가는 유체의 흐름 관찰이 가능한 마이크로모델을 활용하여 수행하였다. 이에 따른 실험 결과, 비이온성 및 음이온성 계면활성제 활용 시 순수한 물인 경우보다 가장 낮은 주입 유량에서 저장 효율은 최소 40% 이상의 향상을 보였다. 하지만, 본 연구에서 활용한 계면활성제의 이온성 및 농도에 따른 유의미한 저장 효율 변화는 도출되지 않았다. 이러한 결과는 향후 이산화탄소 지중 저장을 위한 계면활성제의 선택 및 농도 결정에 활용될 것으로 기대된다.

Keywords : Anionic, Geological storage, Non-ionic, Supercritical carbon dioxide, Surfactant

1 정희원, 충북대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Chungbuk National Univ.)

2 정희원, 충북대학교 토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chungbuk National Univ., Tel: +82-43-261-2405, jjung@chungbuk.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

산업 혁명 이후 급격히 증가한 이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂) 배출은 지구 온난화를 유발하였다(Fig. 1). 이러한 지구 온난화는 기후 위기라는 형태로 인간 생활권에 유례없는 피해를 유발하고 있다. 따라서, 국제 사회는 세계 기후 변화에 공동 대응을 위해 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(International Panel on Climate Change, IPCC)를 구성하였다. IPCC는 기후 위기에 대한 심각성을 인지하고, 2005년 ‘IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage’를 통해 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS)에 대한 기본적인 방향을 제시하였다(IPCC, 2005). 또한, 2018년에 CO₂ 감축의 필요성을 나타내는 ‘Global Warming

of 1.5°C’를 발간하였다(IPCC, 2018).

CCS란 대기 중에 존재하는 CO₂를 포집 후 저장하는 기술을 의미한다. CO₂는 다양한 지질학적 구조에 저장이 가능한 것으로 알려져 있다(Fig. 2). 그중 해저 대수층(Deep Saline Aquifer) 및 유전층(Hydrocarbon or Oil Reservoir)은 덮개암(Cap Rock)이 존재하는 저장 장소 후보군이다. 덮개암은 매우 낮은 투수계수의 암반으로 구성되어 있기 때문에, CO₂ 저장 중 또는 주입완료 후 발생가능한 가스 유출의 차단에 효과적이다(Kaldi et al., 2013). 석탄층(Coal Seam) 및 하이드레이트층(Hydrate Stability Zone)은 CO₂ 주입을 통해 메탄(CH₄)을 생산할 수 있는 경제적 이점이 존재한다(Espinoza et al., 2011). 이 중 해저 염수층 또는 대수층의 저장 가능량은 110Gtc에서 2700Gtc로써, 가장 많은 양의 CO₂ 저장이 가능한

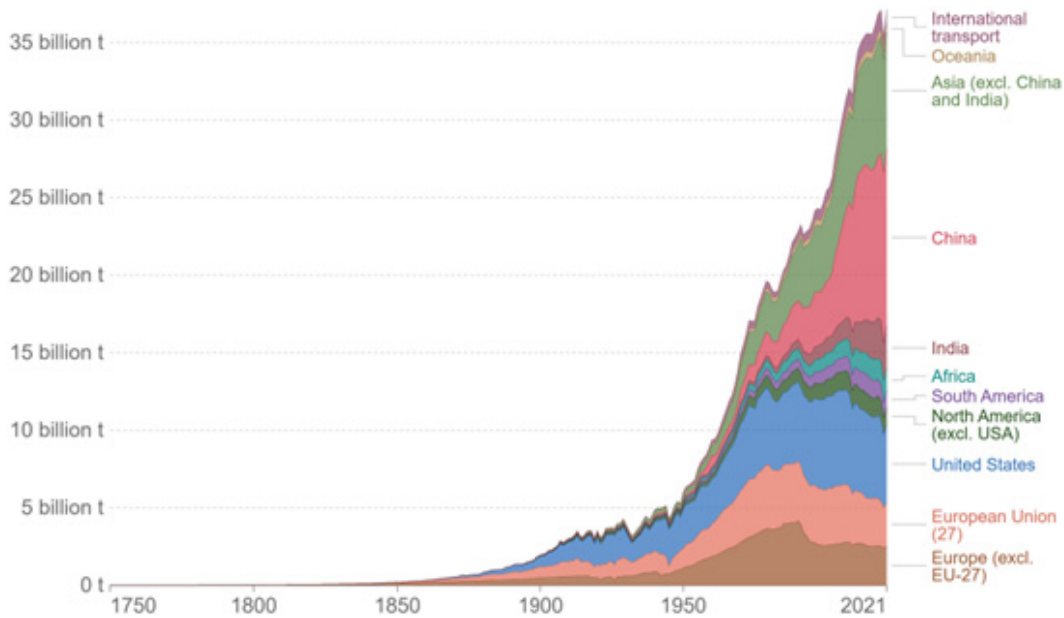


Fig. 1. CO₂ emission from each continental during the 1750~2021 (Ritchie et al., 2020)

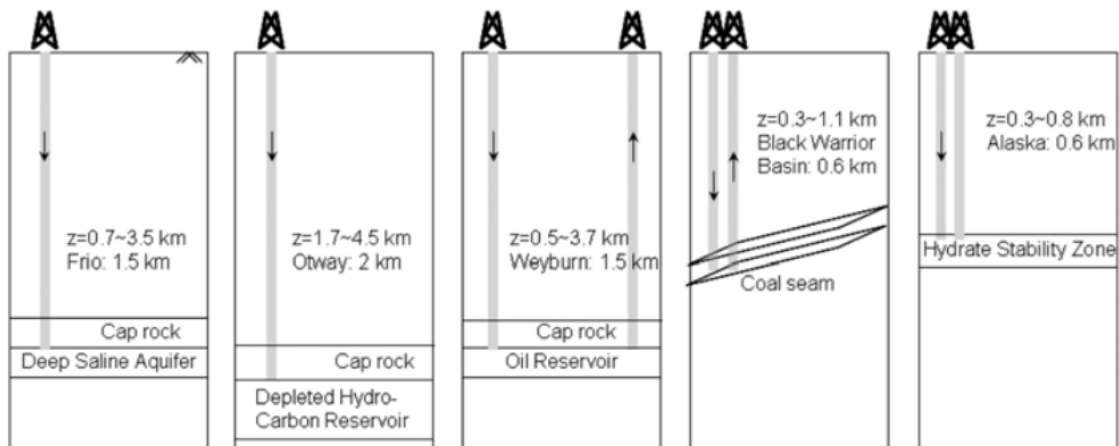


Fig. 2. Schematic diagram of geological CO₂ storage alternatives (Espinoza et al., 2011)

것으로 알려져 있다(Gale, 2004; IPCC, 2005).

해저 염수층은 공극이 유체로 포화된 다공성 매체이다. 제한된 공간인 해저 염수층에 CO₂의 주입 및 저장 효율 향상을 위해 계면활성제, 고분자 화합물 및 바이오 폴리머와 같은 첨가제들이 활용되고 있다. 이러한 첨가제들은 공극 매체 내에서 서로 다른 유체의 계면에 작용하는 모세관 특성 개선에 효과적이다(Kim and Santamarina, 2014; Ryou and Jung, 2022a; Ryou and Jung, 2022b). 이 중 가장 높은 효율 및 성능을 나타내며, 활발한 연구가 진행되는 재료는 계면활성제이다. 계면활성제는 친수기(Hydrophilic)와 소수기(Hydrophobic, Lipophilic and CO₂-philic)로 구성된 양친매성 물질로써, 계면장력의 감소 및 접촉각의 증가를 유도한다(Da Rocha, 1999; Akutsu et al., 2007; Jung and Wan, 2012; Santamarina, 2013; Park et al., 2017). 이러한 계면활성제를 활용한 석유 회수율 향상 분야에 많은 연구가 수행되고 있지만(Negin et al., 2017), CCS의 저장효율 증진을 위한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 친수기가 비이온성 및 음이온성을 나타내는 계면활성제를 활용하여 공극 규모 CO₂ 저장 효율 향상성을 평가하였다.

2. Literature review

2.1 지중 저장소에서의 이산화탄소 특성

화석 연료는 일반적으로 탄화수소(Hydrocarbon)를 포

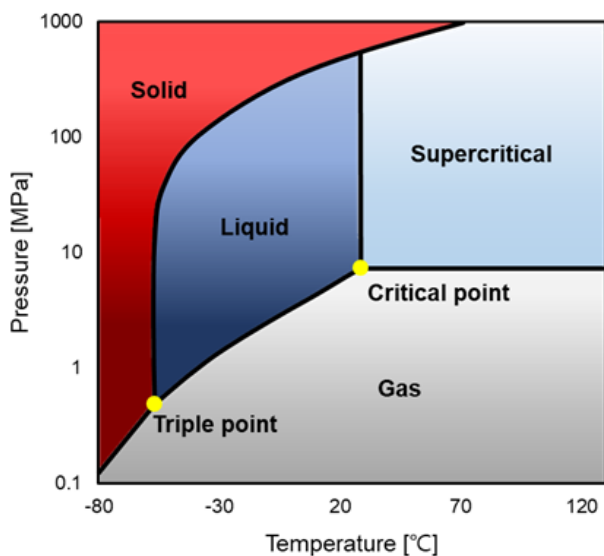


Fig. 3. CO₂ phase diagram with pressure and temperature (Gang and Jung, 2023)

합하는 재료로 연소 시 산화 반응에 따라 CO₂를 생성한다. CO₂의 상은 온도·압력 조건에 따라 변한다(Fig. 3). 대기의 온도·압력 조건에서 CO₂는 기체 상태이지만, 지중의 온도가 30°C 이상이고 압력이 7.1MPa 이상인 조건에서는 초임계(Supercritical) 상태로 상의 전환이 발생한다. 따라서, 해저 대수층의 깊이(~700m)에 따른 수리 역학적 압력 및 지열 경사(25°C/km)를 고려하였을 때, CO₂는 초임계 상태로 존재한다(Zulqarnain et al., 2017). 또한, 해저 600~1000m 범위에서 CO₂의 밀도는 157g/cm³에서 600g/cm³로 증가한다(Angus et al., 1973). 밀도가 증가함에 따라 초임계 이산화탄소(Supercritical Carbon Dioxide, scCO₂)는 액체와 같은 특성을 나타내고, 공극 매체 내에서 높은 저장 효율을 나타내는 이점이 존재한다(Peter et al., 2022).

2.2 마이크로모델을 활용한 이산화탄소 주입 연구

마이크로모델은 공극이 연속적으로 네트워크를 형성하고 있는 장비로, 공극 매체 내에서 발생하는 유체의 흐름 및 상호작용에 대해 시각적으로 규명이 가능하다(Anbari et al., 2018). 마이크로모델 제작에는 일반적으로 유리(Glass) 또는 투명한 고분자 화합물(Transparent polymer)이 활용된다(Karadimitriou and Hassanizadeh, 2012).

위와 같은 이점으로 인해 마이크로모델을 활용한 CO₂ 주입 연구도 활발히 수행되고 있다. Kim et al.(2012)는 포화 상태의 마이크로모델에 scCO₂ 주입 시 시간에 따른 접촉각 및 공극 유체의 이온 강도(Ionic strength)에 따른 공극 표면의 탈수(Dewetting) 과정을 분석하였다. Kazemifar et al.(2015)는 다공성 마이크로모델 내에서 형광 입자를 활용하여 scCO₂ 주입 시 시각적 분석을 통해 공극 규모 속도장(Velocity fields)을 형성하는 방법을 제시하였다. Hu et al.(2017)은 scCO₂로 포화된 마이크로모델에 소금물 주입 시 공극 표면의 습윤성(Wettability)에 따른 scCO₂의 capillary trapping에 대해 연구하였다. Zheng et al.(2017)은 마이크로모델이 소금물로 포화되어 있는 조건에서 상(Gas, liquid, supercritical)에 따른 CO₂ 주입 시 주입 패턴 및 효율에 대한 연구를 수행하였다. Nishad and Raoush(2020)은 마이크로모델 내 공극 유체의 이온 강도에 따른 주입 유체인 CO₂의 colloid retention 효과에 대해 연구를 수행하였다. 하지만, 계면활성제를 활용한 CO₂ 주입 효율 향상 연구는 부족한 실정

이다. 따라서, 본 연구에서는 계면활성제를 활용한 scCO₂의 공극 규모 주입 특성을 평가하기 위해 마이크로모델을 활용하였다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1 실험 재료

본 연구에서 사용한 유체는 크게 3가지로 분류된다. 첫 번째로 탈 이온수(Deionized water, DI water) 제조를 위해서 초순수 정수 장비(Human. corp, green RO 350)를 활용하였다. 초순수 정수 장비를 통해 만들어진 탈 이온수의 전기전도도는 1~30 μ s/cm 범위이다. 두 번째로 기체 상태의 초순수 CO₂이다. CO₂는 실린더 용기로부터 이스코 펌프에 공급되고, 이를 통해 압력이 조절된다. 세 번째로 계면활성제 수용액은 파우더 형태의 계면활성제를 실험 조건의 농도에 맞게 DI water에 자력식 교반기를 활용하여 제조하였다. 본 연구에서 사용한 계면활성제의 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다.

3.2 실험 장비 및 방법

본 연구에서 scCO₂ 주입을 위해 사용한 장비는 마이

크로모델, 이스코 펌프, 공기 가열 장치, 온도 조절 장치 및 마이크로렌즈 카메라이다. 마이크로모델은 Micronit BV사에서 0.1~2mm 두께의 Borosilicate glass 또는 Fused silica를 활용하여 제작한 균일 공극 마이크로모델을 사용하였다. 실험에 사용한 마이크로모델의 공극 구조는 Fig. 4와 같다. 이스코 펌프(Teledyne, 500X)는 scCO₂의 압력 조건 형성을 위해 사용되었으며, 온도 조건은 공기 가열 장치(Cole Parmer, Master Appliance, HG-502D) 및 온도 조절 장치(Gibao Lab, GLTC-DP)를 통해 형성하였다. 마이크로렌즈 카메라(Nikon D7000, 16.2 megapixels)는 모든 주입 과정을 영상으로 기록하는데 활용되었다. 이러한 장비들로 구축한 주입 시스템은 Fig. 5와 같은

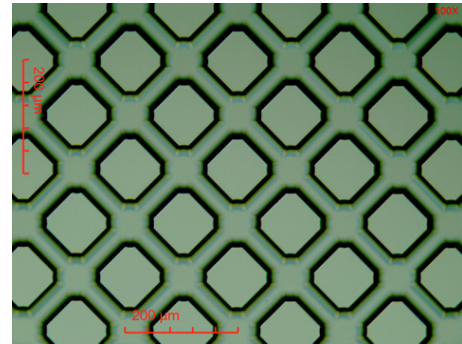


Fig. 4. Microscopic image of uniform network micromodel

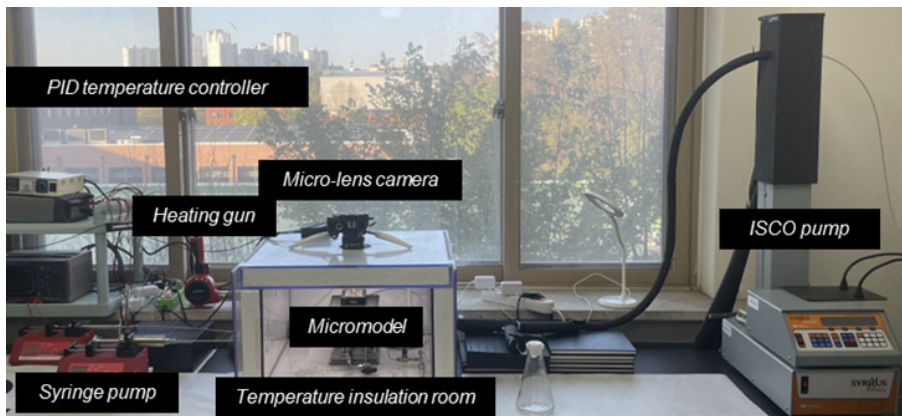


Fig. 5. Pictorial view of experimental scCO₂ injection system

Table 1. Physical and chemical properties of surfactants used in this study

Property	Alkyl Polyglucoside [APG]	Sodium dodecylbenzene [SDBS]
Product name	Glucopon 600 CSUP	-
Physical form	Liquid (at 23°C)	Crystalline powder
Density [g/cm ³]	1.08 (at 40°C)	≥0.18g/mol
pH	12 (20% in 15% IPA)	6.9 (1% solution)
Surface tension [mN/m]	28 (1g/L in distilled water, at 23°C)	-
CAS number	170905-55-2	25155-30-0

며, 수행한 실험 방법은 다음과 같다. 실험 준비 단계로, 마이크로모델에 일정량의 DI water 및 에탄올 반복 주입을 통해 공극 내부 청소를 수행한다. 청소 후 마이크로모델은 100°C 조건에서 약 24시간 동안의 건조 과정을 통해 공극 내 잔류 유체를 제거한다. 다음 본 실험 단계로 마이크로모델은 insulation room 내부 중앙에 위치하며, 실험 조건에 따라 DI water 또는 계면활성제 수용액으로 포화한다. 포화 후 마이크로모델은 45°C 조건에서 약 2시간 동안 안정화 과정을 거친다. 이후 최종적으로 주입 유량에 따라 scCO₂ 주입을 수행한다. 본 실험에서 수행하는 마이크로모델 포화부터 scCO₂ 주입이 완료되는 시점까지 모든 과정은 마이크로렌즈 카메라의 비디오 촬영을 통해 기록된다. 실험에 적용된 계면활성제의 농도 및 주입 속도는 Table 2와 같다.

4. 실험 결과 및 분석

Fig. 6은 마이크로모델 내 scCO₂ 주입이 완료된 RGB 이미지를 나타낸다. 그림에서 어두운색 부분은 공극수,

밝은색은 scCO₂를 의미한다. 공극수가 DI water인 경우 scCO₂는 짧은 주입 거리에서 중앙 부분에 손가락 모양의 핑거링(Fingering)이 발생하며, 마이크로모델의 양쪽 벽면을 따라 주입되는 특성을 나타낸다(Fig. 6a). 그러나, 공극수가 APG인 경우 주입 거리 증가에도 fingering이 발생하지 않으며 DI water와 비교하여 균일한 치환(Stable displacement) 양상을 나타낸다(Fig. 6b, Fig. 6c). 계면활성제 농도가 0.01wt%(Fig. 6b)에서 0.02wt%(Fig. 6c)로 증가함에 따라 검은색 실선으로 표시된 부분에서 밝은색으로 나타나는 scCO₂에 의한 치환 면적이 증가한다.

4.1 주입 유량에 따른 저장 효율

정량적인 저장 효율은 Fig. 6에서 어두운색(공극수)과 밝은색(scCO₂)의 면적비로 평가한다. DI water 주입 시 0.001mL/min 주입 유량에서의 저장 효율은 42%를 나타내고, 주입 유량이 증가할수록 저장 효율은 크게 증가한다. 예를 들어, 0.05mL/min의 주입 유량에서의 저장 효율은 88%를 나타낸다. APG 계면활성제를 사용할 경우 0.001mL/min 주입 유량에서의 저장 효율은 89.57% (0.01wt%) 및 91.84%(0.02wt%)로 DI water에 비해 매우 큰 폭으로 증가하였다. 하지만, 주입 유량이 0.001 mL/min에서 0.1mL/min으로 증가하는 동안 저장 효율 증가량은 약 10%로서, 주입 유량에 따른 저장 효율 증가량은 상대적으로 미비하게 나타난다. 또한, APG 농도에 따른 저장 효율의 차이는 크게 나타나지 않는다. 이러한 결과는 본 연구의 공극 규모 실험에 한해서는 0.01wt%

Table 2. Temperature and pressure conditions of each phase

Case	Type	Volumetric injection flow rate [mL/min]
Case 1	Water	0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1
Case 2	APG 0.01wt%	0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1
Case 3	APG 0.02wt%	0.001, 0.005, 0.01, 0.05
Case 4	SDBS 0.01wt%	0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1
Case 5	SDBS 0.02wt%	0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1

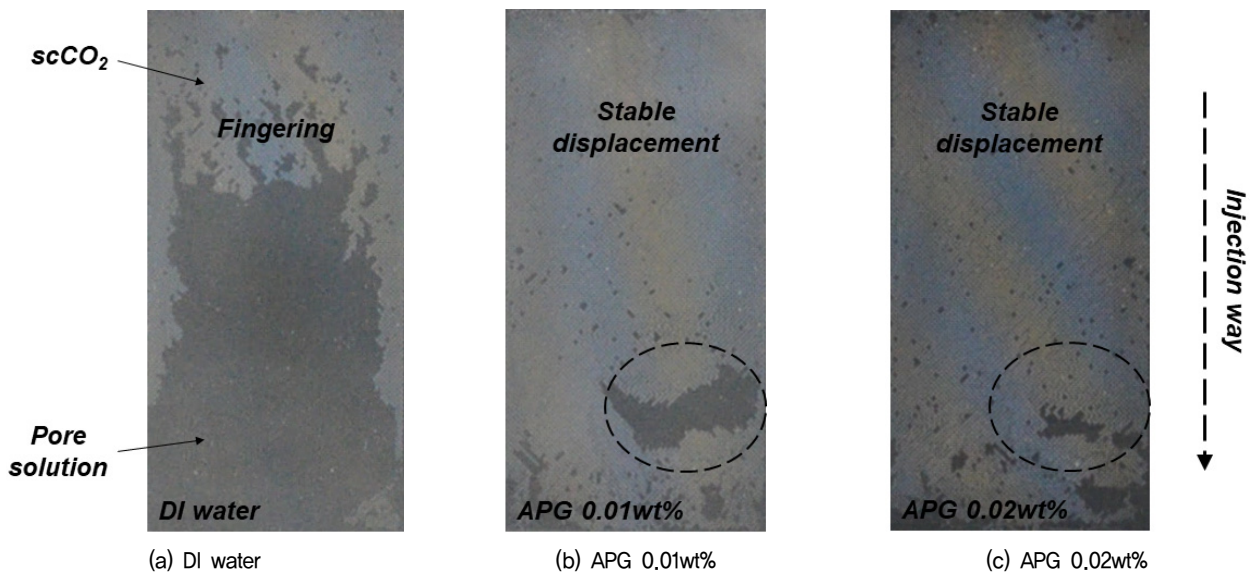
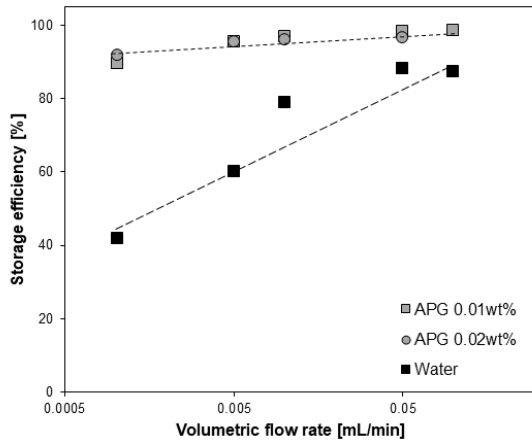
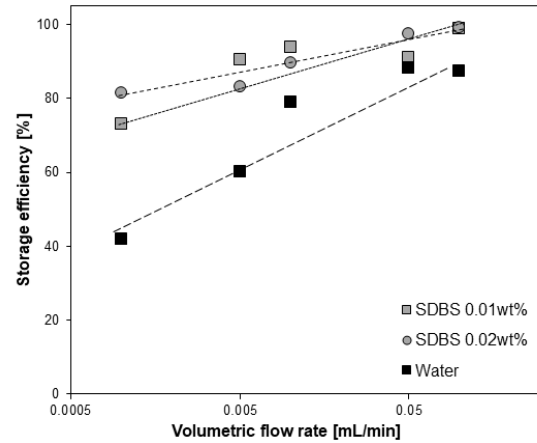


Fig. 6. RGB image of micromodel. After scCO₂ injection completed (volumetric injection flow rate: 0.001mL/min)



(a) APG surfactant



(b) SDBS surfactant

Fig. 7. Effect of volumetric flow rate on storage efficiency (a) APG surfactant (b) SDBS surfactant

농도가 저장 효율을 증가시키는데 충분함을 나타낸다 (Fig. 7a).

SDBS의 경우, 0.001mL/min의 주입 유량에서의 저장 효율은 73.18%(0.01wt%) 및 81.48%(0.02wt%)로서, DI water에 비해 큰 폭으로 증가하였으나 APG보다는 낮은 효율을 나타낸다. 주입 유량이 0.001mL/min에서 0.1mL/min으로 증가하는 동안 저장 효율 증가량은 약 26.11%(0.01wt%) 및 17.81%(0.02wt%)로서, APG보다 크게 나타난다. 하지만, SDBS의 농도(0.01wt%, 0.02wt%)에 따른 저장 효율 차이는 크게 나타나지 않는다(Fig. 7b).

4.2 농도에 따른 저장 효율

현장에서의 CO₂ 주입 유량 실험에 근거한 공극 규모 마이크로모델 실험의 주입 유량은 0.001mL/min으로 대표할 수 있다(Chang et al., 2020). 따라서, 본 연구의 실험 결과 및 문헌에서의 데이터를 포함하여 0.001mL/min 주입 유량에서 계면활성제 농도에 따른 저장 효율을 표현하였다(Fig. 8). 그 결과, SDS, SDBS 및 APG 계면활성제 모두 농도가 증가함에 따라, 저장 효율이 증가함을 나타내고 있다. SDS 및 APG는 0.01wt% 및 0.02wt%의 농도에서 유사한 저장 효율을 나타내고 있으나, SDBS는 농도 증가에 따른 저장 효율 증가량이 상대적으로 크게 나타난다. 이를 바탕으로 공극 규모에서 계면활성제 수용액 주입 시 최적의 주입 농도를 결정할 수 있다. 현장 조건을 고려한 농도의 변환이 필요할 것으로 사료되나, 본 실험 결과는 최적의 농도 결정을 위한 기초자료로 활용될 것으로 판단된다.

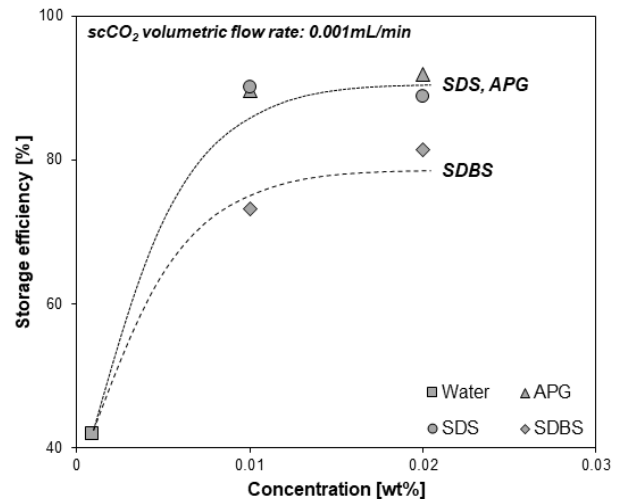


Fig. 8. Storage efficiency of scCO₂ on concentration. SDS data get from previous study (Gang and Jung, 2023)

5. 결론

본 연구에서는 공극 내에 존재하는 계면활성제 활용에 따른 scCO₂ 주입 시 저장 효율에 대한 평가를 수행하였다.

DI water의 주입은 0.001mL/min 주입 유량에서 fingering 현상과 함께 낮은 저장 효율을 나타낸다. 하지만, 주입 유량 증가(0.001~0.1mL/min)에 따른 저장 효율은 크게 증가한다.

APG 및 SDBS 계면활성제의 사용은, DI water에 비해 낮은 주입 유량(0.001mL/min)에서 높은 주입 효율을 나타낸다. 이에 주입 유량의 증가에 따른 저장 효율은 상대적으로 미비하게 나타난다.

0.001mL/min 주입 유량에서 APG가 SDBS보다 높은

저장 효율을 나타내고 있다. 하지만, 0.1mL/min에서의 저장 효율은 유사하게 나타난다. 이는 주입 유량 증가에 따른 저장 효율 증가가 두 계면활성제의 효율 차이를 감소시켰기 때문이다.

APG 및 SDBS의 농도 증가에 따른 저장 효율의 차이는 크게 나타나지 않는다. 이는 공극 규모 scCO₂ 주입 실험에는 0.01wt% 농도가 높은 저장 효율을 가지는데 충분한 조건임을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원의 지원을 받아 수행된 연구(No. 20212010200010)이며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- Akutsu, T., Yamaji, Y., Yamaguchi, H., Watanabe, M., Smith Jr, R. L., and Inomata, H. (2007), Interfacial Tension between Water and High Pressure CO₂ in the Presence of Hydrocarbon Surfactants, *Fluid phase equilibria*, Vol.257, No.2, pp.163-168.
- Anbari, A., Chien, H. T., Datta, S. S., Deng, W., Weitz, D. A., and Fan, J. (2018), Microfluidic Model Porous Media: Fabrication and Applications, *Small*, Vol.14, No.18, 1703575.
- Angus, S., B. Armstrong, and K.M. de Reuck (1973), International Thermodynamic Tables of the Fluid State Volume 3. Carbon Dioxide. IUPAC Division of Physical Chemistry, Pergamon Press, London, pp.266-359.
- Chang, C., Kneafsey, T. J., Wan, J., Tokunaga, T. K., and Nakagawa, S. (2020), Impacts of Mixed-wettability on Brine Drainage and Supercritical CO₂ Storage Efficiency in a 2.5-D Heterogeneous Micromodel, *Water Resources Research*, Vol.56, No.7, e2019WR026789.
- Da Rocha, S. R., Harrison, K. L., and Johnston, K. P. (1999), Effect of Surfactants on the Interfacial Tension and Emulsion Formation between Water and Carbon Dioxide, *Langmuir*, Vol.15, No.2, pp. 419-428.
- Espinoza, D. N., Kim, S. H., and Santamarina, J. C. (2011), CO₂ Geological Storage-Geotechnical Implications, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15, pp.707-719.
- Gale, J. (2004), Geological Storage of CO₂: What do We Know, Where are the Gaps and What More Needs to be Done, *Energy*, Vol.29, No.9-10, pp.1329-1338.
- Gang, S. and Jung, J. (2023), Characteristic of Injection According to CO₂ Phases Using Surfactants, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.24, No.6, pp.5-11.
- Hu, R., Wan, J., Kim, Y., and Tokunaga, T. K. (2017), Wettability Impact on Supercritical CO₂ Capillary Trapping: Pore Scale Visualization and Quantification, *Water Resources Research*, Vol.53, No.8, pp.6377-6394.
- IPCC (2005), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- IPCC (2018), Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. [https://doi.org/ 10.1017/9781009157940](https://doi.org/10.1017/9781009157940).
- Jung, J. W. and Wan, J. (2012), Supercritical CO₂ and Ionic Strength Effects on Wettability of Silica Surfaces: Equilibrium Contact Angle Measurements, *Energy & Fuels*, Vol.26, No.9, pp.6053-6059.
- Kaldi, J., Daniel, R., Tenthorey, E., Michael, K., Schacht, U., Nicol, A., Underschultz, J., and Backe, G. (2013), Containment of CO₂ in CCS: Role of Caprocks and Faults, *Energy Procedia*, 37, pp. 5403-5410.
- Karadimitriou, N. K. and Hassanizadeh, S. M. (2012), A Review of Micromodels and Their Use in Two-phase Flow Studies, *Vadose Zone Journal*, 11(3).
- Kazemifar, F., Blois, G., Kyritsis, D. C., and Christensen, K. T. (2015), A Methodology for Velocity Field Measurement in Multiphase High Pressure Flow of CO₂ and Water in Micromodels, *Water Resources Research*, 51(4), pp.3017-3029.
- Kim, S. and Santamarina, J. C. (2014), Engineered CO₂ Injection: The Use of Surfactants for Enhanced sweep efficiency, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 20, pp.324-332.
- Kim, Y., Wan, J., Kneafsey, T. J., and Tokunaga, T. K. (2012), Dewetting of Silica Surfaces Upon Reactions with Supercritical CO₂ and Brine: Pore-scale Studies in Micromodels, *Environmental science & technology*, Vol.46, No.7, pp.4228-4235.
- Negin, C., Ali, S., and Xie, Q. (2017), Most Common Surfactants Employed in Chemical Enhanced Oil Recovery, *Petroleum*, Vol.3, No.2, pp.197-211.
- Nishad, S. and Al-Raoush, R. I. (2020), Impact of Ionic Strength on Colloid Retention in a Porous Media: A Micromodel Study.
- Park, T., Joo, H. W., Kim, G. Y., Kim, S., Yoon, S., and Kwon, T. H. (2017), Biosurfactant as an Enhancer of Geologic Carbon Storage: Microbial Modification of Interfacial Tension and Contact Angle in Carbon Dioxide/water/quartz Systems, *Frontiers in microbiology*, 8, 1285.
- Peter, A., Yang, D., Eshiet, K. I. I., and Sheng, Y. (2022), A Review of the Studies on CO₂-Brine-Rock Interaction in Geological Storage Process, *Geosciences*, Vol.12, No.4, p.168.
- Ritchie, H., Roser, M., and Rosado, P. (2020), CO₂ and greenhouse gas emissions, Our world in data.
- Ryou, J. E. and Jung, J. (2022), Characteristics of Biopolymer Guar Gum Solution Injection for Eco-friendly Ground Reinforcement, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.22, No.1, pp.201-207.
- Ryou, J. E. and Jung, J. (2022), Penetration Behavior of Biopolymer Aqueous Solutions Considering Rheological Properties, *Geomechanics and Engineering*, Vol.29, No.3, pp.259-267.

25. Santamarina, J. C. (2013), CO₂ Geologic Storage: Coupled Hydro-Chemo-Thermo-Mechanical Phenomena-From Pore-scale Processes to Macroscale Implications, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA (United States).
26. Zheng, X., Mahabadi, N., Yun, T. S., and Jang, J. (2017), Effect of Capillary and Viscous Force on CO₂ Saturation and Invasion Pattern in the Microfluidic Chip, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.122, No.3, pp.1634-1647.
27. Zulqarnain, M., Zeidouni, M., and Hughes, R. G. (2017, July), Static and dynamic CO₂ storage capacity estimates of a potential CO₂ geological sequestration site in Louisiana chemical corridor. In Carbon Management Technology Conference (pp. CMTC-486020). CMTC.

Received : October 18th, 2023

Revised : October 29th, 2023

Accepted : October 30th, 2023