

계면활성제를 활용한 이산화탄소 상태에 따른 주입특성 평가

Characteristic of Injection According to CO₂ Phases Using Surfactants

강석구¹⁾ · 정종원[†]

Seokgu Gang · Jongwon Jung

Received: March 8th, 2023; Revised: March 27th, 2023; Accepted: April 13th, 2023

ABSTRACT : The engineering industry heavily relies on fossil fuels such as coal and petroleum to generate energy through combustion. However, this process emits carbon dioxide into the atmosphere, leading to global warming. To mitigate this issue, researchers have explored various methods to reduce carbon dioxide emissions, one of which is carbon dioxide underground storage technology. This innovative technology involves capturing carbon dioxide from industrial plants and injecting it into the saturated ground layer beneath the earth's surface, storing it securely underground. Despite its potential benefits, carbon dioxide underground storage efficiency needs improvement to optimize storage in a limited space. To address this challenge, our research team has focused on improving storage efficiency by utilizing surfactants. Furthermore, we evaluated how different carbon dioxide states, including gaseous, liquid, and supercritical, impact storage efficiency based on their respective pressures and temperatures within the underground reservoir. Our findings indicate that using surfactants and optimizing the injection rate can effectively enhance storage efficiency across all carbon dioxide states. This research will pave the way for more efficient carbon dioxide underground storage, contributing to mitigating the environmental impact of fossil fuels on the planet.

Keywords : Micromodel, Surfactant, Carbon dioxide, Sequestration

요지 : 석탄 및 석유와 같은 전통적인 화석 연료는 연소 시 발생하는 열을 통해 에너지를 공급한다. 이러한 과정에서 대기 중에 이산화탄소를 배출하고 지구 온난화를 유발한다. 이산화탄소 저감을 위해 많은 연구들이 수행되고 있다. 이러한 방안 중 하나로, 이산화탄소 지중 저장 기술이 관심을 받고 있다. 이산화탄소 지중 저장은 플랜트 등에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 덮개암 하부 포화지반층에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 방법을 일컫는다. 하지만, 제한된 공간에 더 많은 양의 이산화탄소 저장을 위해서는 저장 효율의 향상이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 계면활성제를 활용하여 이산화탄소 지중 저장의 효율을 향상하고자 한다. 또한, 지중저장소의 위치에 따라 압력 및 온도가 상이하기 때문에 이산화탄소는 기체, 액체 및 초임계 상태로 존재가능하다. 따라서, 이산화탄소 상태에 따른 저장 효율 특성을 평가하였다. 그 결과, 주입속도 및 계면활성제의 활용은 저장 효율의 향상을 기대할 수 있고, 그 효과는 기체, 액체 및 초임계 상태 이산화탄소에 발휘되는 것을 확인하였다.

주요어 : 마이크로모델, 계면활성제, 이산화탄소, 지중 저장

1. 서론

1990년부터 2020년까지 화석연료에 의한 세계 이산화탄소 배출량은 큰 폭으로 증가하는 추세이다(Fig. 1(a); Jackson et al., 2022). 중국, 미국, 유럽 및 인도 지역의 이산화탄소 배출량이 큰 비중을 차지하고 있으며, 지속적으로 증가하고 있다(Fig. 1(b); Jackson et al., 2022). 이산화탄소 배출은 지구 온난화를 유발하고 인류에게 막대한 인적·물질 피해를 발생시킨다(Tsouris et al., 2010; Xie & Economides, 2009).

따라서, 국제 사회는 다양한 국가 간 협의회 구성을 통해 해결책을 도모하고 있다. 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(International Panel on Climate Change, IPCC)는 2018년

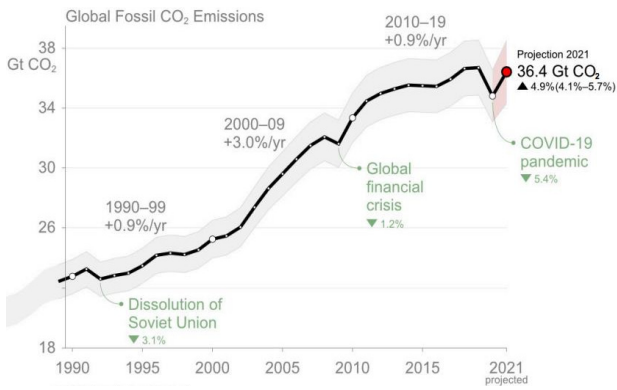
‘지구 온난화 1.5°C 특별보고서’를 승인하였으며, 파리 기후 협약을 통해 모든 국가의 탄소 저감 계획을 의결하였다. 국제 협약에 따라 국내에서도 ‘2050 탄소중립 정책’ 수립 및 구체적인 주요 추진 전략(목표 감축량)을 제시하였다(Table 1; Government of the Republic of Korea, 2020).

현재 국내·외에서 탄소 중립 이행을 위한 주요 전략 중 하나로 이산화탄소 포집 및 지중 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)이 고려되고 있다. CCS는 육상에 존재하는 산업단지 및 화력발전소 등과 같은 대규모 온실가스 배출원에서 포집된 이산화탄소를 해상 플랫폼으로 수송 후 주입정을 통해 해저 심부 대수층에 주입 및 저장을 목표로 한다(Fig. 2).

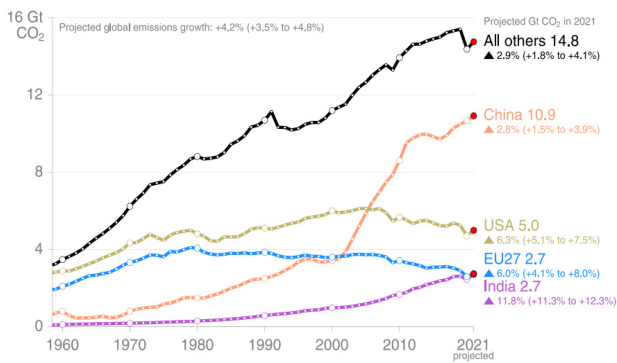
이산화탄소 지중 저장을 위한 심부 염수층은 주입과정 및

1) Ph.D student. Candidate, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

† Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : jjung@chungbuk.ac.kr)



(a)



(b)

Fig. 1. CO₂ emission caused by fossil fuel from 1990 to 2020 (a) CO₂ emission of global (b) CO₂ emission of China, USA, EU and India (Jackson et al., 2022)

Table 1. 2050 carbon neutral strategy of KOREA (Government of the Republic of Korea, 2020)

Classification	Parts	2018	A	B
Emission [Mt]	Total	686.3	0	0
	Diversion	269.6	0	20.7
	Industry	260.5	51.1	51.1
	Construction	52.1	6.2	6.2
	Transport	98.1	2.8	9.2
	Agriculture	24.7	15.4	15.4
	Waste	17.1	4.4	4.4
	Hydrogen	-	0	9
	Desalination emission	5.6	0.5	1.3
Adsorption and elimination [Mt]	Adsorption	-41.3	-25.3	-25.3
	CCUS	-	-55.1	-84.6
	DAC	-	-	-7.4

완료 후 발생할 수 있는 누출의 차단이 중요하다. 따라서, 투수계수가 낮은 덮개암이 존재하는 해저 800m가 적합한 것으로 알려져 있다. 해저 800m에서의 온도 및 압력 조건을 고려하였을 때 이산화탄소는 초임계 상태로 존재할 것으로 예상된다(IPCC, 2005; GCCSI, 2015; Gwon, 2016).

심부 염수층으로 주입되는 이산화탄소와 공극 내의 유체

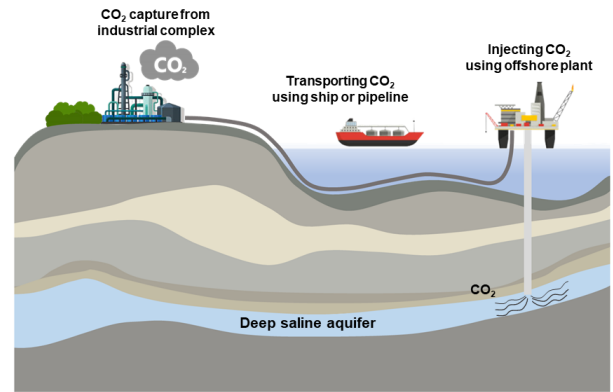


Fig. 2. Courtesy of a schematic diagram with geological carbon dioxide storage

경계에는 높은 계면장력이 작용하고, 이는 이산화탄소 주입 및 저장 효율의 저하를 유발한다(Cao et al., 2016; Jafari & Jung, 2017; 2019). 이를 해결하기 위해 계면활성제, 고분자 화합물 및 바이오 폴리머를 기반으로 계면장력의 저감 및 저장 효율 향상을 위한 선행 연구가 수행되어 왔다. 하지만, 대부분의 연구는 이산화탄소 및 유체간의 계면장력 측정에 집중되어 있다(Park et al., 2021; Ryou & Jung, 2022(a); Ryou & Jung, 2022(b); Ha & Jung, 2019, Chang et al., 2021).

따라서, 본 연구에서는 계면활성제를 활용한 이산화탄소 저장 효율 특성을 평가하였다. 특히, 다양한 주입장소의 온도 및 압력을 고려하여 이산화탄소의 상태(기체, 액체 및 초임계 상태)에 따른 저장 효율 특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 계면활성제의 물리적 · 화학적 특성

계면활성제(surfactant)는 구조적으로 친수기(hydrophilic)와 소수기(hydrophobic)로 구성되는 분자로서, 서로 다른 물질의 계면 사이에 작용하는 에너지 감소를 통해 혼성(miscible) 상태를 유도한다(Fig. 3).

계면활성제는 물에 용해되는 과정에서 계면활성제의 소수성 부분이 핵을 형성하고 친수성 부분이 표면을 형성하는 집합체를 구성하고, 농도가 증가함에 따라 일정 농도 이상에 모인

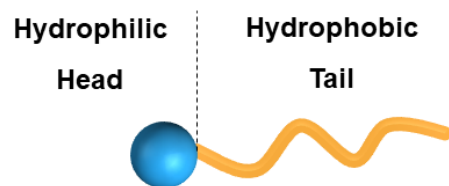


Fig. 3. Courtesy of Schematic structure about surfactant

집합체를 의미하는 미셀(micelle)을 형성한다. 이때의 농도를 임계 미셀 농도(critical micelle concentration, CMC)라 한다. 계면활성제의 농도가 증가할수록 계면장력은 감소하지만, CMC 이상의 농도에서는 수렴하는 경향을 나타낸다.

계면활성제는 친수기 전하 상태에 따라 음이온성, 양이온성, 비이온성 및 양친매성으로 분류된다. 이산화탄소 지중 저장을 위한 지반에는 사암이 많이 존재하고(Iglauer et al., 2011; Finley et al., 2013), 사암의 표면은 전기적으로 음성을 나타낸다. 따라서, 양이온성 계면활성제의 주입은 정전기적 인력으로 인해 사암 표면에 흡착이 발생하고, 이는 계면장력의 감소에 기여하지 못하게 된다. 이러한 특성을 고려하여, 본 연구에서는 사암 지반의 전기적 특성에 적합한 음이온성 계면활성제를 활용하였다.

2.2 모세관 압력

국내 CCS는 덮개암이 존재하는 심부 염수층에 이산화탄소 주입을 계획하고 있다. 지중 저장을 위한 이산화탄소 주입 과정에서 공극수에 의한 높은 모세관 압력(Capillary pressure) 특성은 덮개암의 안정성 및 저장 효율에 부정적인 영향을 끼친다(Kang et al., 2015). 모세관 압력은 공극 크기, 계면장력(interfacial tension, IFT) 및 흡과의 표면접촉각(contact angle, CA)에 영향을 받으며, Eq. (1)을 활용하여 산정이 가능하다.

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{R} \quad (1)$$

σ : Interfacial tension

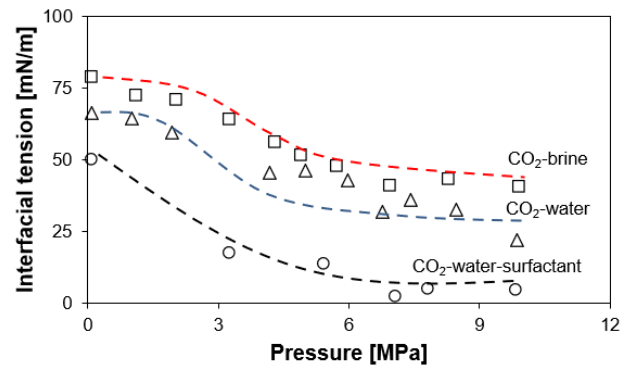
θ : Contact angle

R : Pore radius

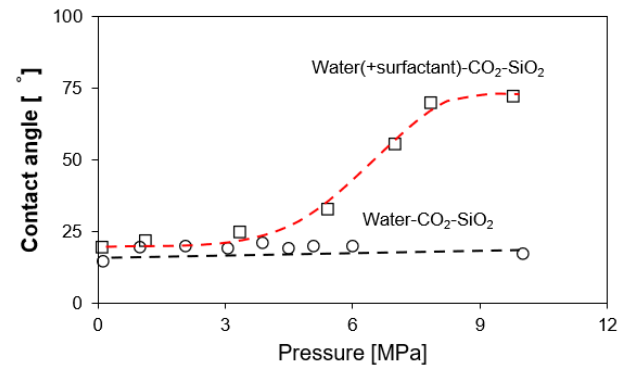
선행 연구 결과는 Surfonic POA-25R2 계면활성제에 의한 유체 간 계면장력 감소 및 표면 접촉각의 증가를 보여준다(Fig. 4; Kim & Santamarina, 2014). 이러한 결과에 근거하여, 계면활성제의 활용은 이산화탄소 지중 저장 과정에서 모세관 압력을 낮추고 저장 효율을 증가시킬 것으로 기대된다.

2.3 주입효율

다공성 매체에서 비혼성 유체 주입에 따른 주입효율은 2 가지 무차원수에 지배적인 영향을 받는다. 첫 번째로 N_m 은 점성수로 주입 유체(μ_1)와 공극수(μ_2)의 비이고, 두 번째로 N_c 는 모세관수로 주입 유체와 주입속도(v) 및 모세관 특성($\sigma \cdot \cos\theta$)의 비이다(Lenormand et al., 1988).



(a)



(b)

Fig. 4. Variation of interfacial tension and contact angle with pressure (a) interfacial tension (b) contact angle (modified from Kim and Santamarina, 2014)

$$N_m = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2)$$

$$N_c = \frac{\mu_1 v}{\sigma \cdot \cos\theta} \quad (3)$$

무차원수 N_c 및 N_m 의 크기에 따라 공극 내에서 비혼성 주입 유체는 viscous fingering, capillary fingering 및 stable displacement와 같은 주입 패턴이 결정되며, N_m 및 N_c 의 증가에 따라 유체는 stable displacement 경향을 나타내고 이는 주입효율 증가로 이어진다. 따라서, 본 연구에서는 N_c 증가를 통한 주입효율 향상을 위해 주입속도 및 계면활성제 종류 및 농도에 따른 연구를 수행하였다.

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험 재료

본 연구에서는 탈 이온수(deionized water, DI), 음이온성 계면활성제(anionic surfactant) 및 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂)를 사용하였다. 탈 이온수(deionized water, DI)는 초순수

Table 2. Physical and chemical properties of SDS

	SDS
Molecular formula	$C_{12}H_{25}O_4SNa$
Molecular weight [g/mol]	288.38
Density [g/cm ³]	0.37
pH	9.1 (at 10 g/l)
CAS number	151-21-3

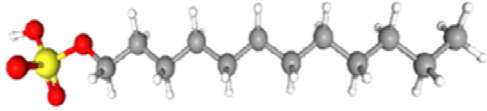


Fig. 5. Molecular structure of SDS

정수 장치(human.corp, green RO 350)를 활용하여 제조하였다. 정수 과정을 거친 탈 이온수의 전기전도도는 1~30 $\mu S/cm$ 이다. 본 연구에서는 음이온성 계면활성제로써 sodium dodecyl sulfate(SDS)를 사용하였다. SDS의 특성 및 분자구조는 Table 2 및 Fig. 5와 같다.

3.2 실험 장비 및 방법

본 연구에서 수행한 마이크로모델 주입실험 시스템은 Fig. 6과 같다. Micronit BV에서 제작한 균일한 공극 구조(uniform network)의 마이크로모델을 사용하였다. 공극수는 고압 주사기(stainless steel syringe)(KD scientific) 및 펌프(New era pump systems.inc, NE-1010)를 활용하여 마이크로모델로 주입되었다. 마이크로렌즈 카메라(Nikon D7000)를 설치하여 주입과정을 모니터링하였고, 획득된 데이터는 Image J를 활용하여 저장 효율을 산정하였다(Gang & Jung, 2022).

압력 및 온도는 ISCO pump(teledyne, 500X), 항온수조 및 자켓을 활용하여 조절하였다. 본 연구에서 수행한 온도 및 압력 조건은 Table 3 및 Fig. 7과 같다. Phase 1, 2, 3은 각각 가스, 액체 및 초임계 상태의 이산화탄소를 나타낸다 (Table 3).

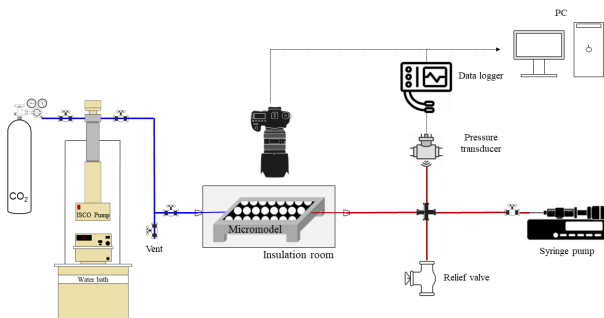


Fig. 6. Schematic diagram of micromodel system

Table 3. Temperature and pressure conditions of each phase

	Temperature [°C]	Pressure [MPa]
Phase 1 (gas)	25, 40	0.5, 4
Phase 2 (liquid)	25	8
Phase 3 (super critical)	40	8

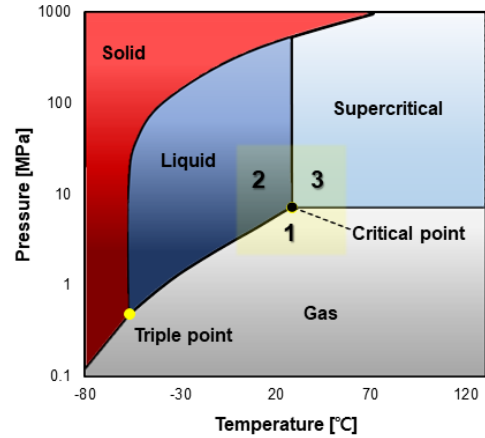


Fig. 7. Experimental pressure and temperature conditions considering phase diagram of carbon dioxide

4. 실험 결과

Fig. 8은 이산화탄소 주입 완료 후 마이크로모델의 이미지 처리 결과를 나타낸다. 흑색은 주입된 이산화탄소를 나타내고, 백색은 물을 나타내고 있다. 따라서, 흑색의 면적을 전체 면적으로 나눈 값을 저장 효율이라고 정의한다. 계면활성제를 사용하지 않은 경우(Fig. 8(a))보다 사용한 경우(Fig. 8(b), 8(c)), 저장 효율이 증가하였음을 직관적으로 확인 가능하다.

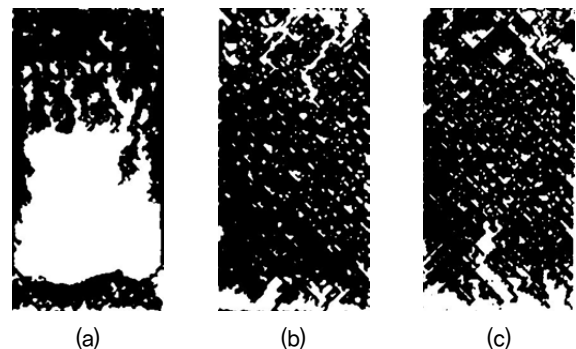


Fig. 8. Images after CO₂ injection test (flow rate: 0.01 ml/min, pressure: 8 MPa and temperature: 40°C) (a) pure water (b) 0.01 wt% SDS (c) 0.02 wt% SDS

4.1 이산화탄소 주입속도에 따른 저장 효율

본 절에서는 순수 이산화탄소 및 계면활성제를 활용하여 이산화탄소 저장 효율 분석 결과에 대해 서술한다. Fig. 9(a)는 계면활성제를 사용하지 않은 경우의 이산화탄소 저장 효율이다. Fig. 9(b), 9(c), 9(d)는 계면활성제를 사용한 경우의 실험 결과이며, 각각 기체, 액체, 및 초임계 상태의 이산화탄소 저장 효율을 나타낸다.

4.1.1 순수 이산화탄소 주입

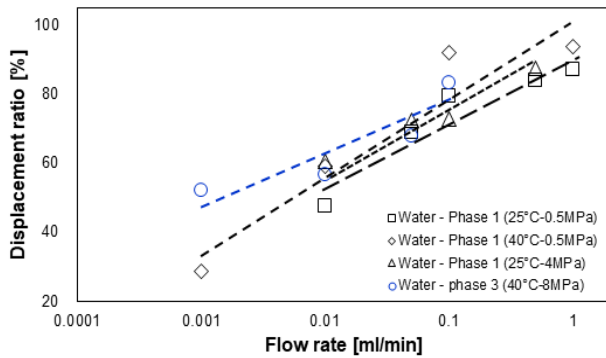
계면활성제를 사용하지 않은 경우, 느린 주입속도에서 저장 효율은 상대적으로 낮으나, 주입속도의 증가에 따라 저장 효율은 증가한다(Fig. 9(a)). 모든 주입속도에서 기체 상태보다 초임계 상태 이산화탄소 주입 시 높은 저장 효율을 나타낸다. 특히, 상대적으로 느린 주입속도에서 저장 효율의 차이는 크게 나타난다. 예를 들어, 0.001ml/min에서 기체 상태의 이산화탄소 주입 시 23% 높은 주입효율을 나타낸다. 하지만, 빠른 주입속도(1ml/min) 조건에서 저장 효율은 유사하다. 느린 주입속도에서는 이산화탄소의 상태가 저장 효율에 미치는 영향이 크지만, 빠른 주입속도에서는 이산화탄소의 상태에 의한 영향이 주입속도보다 상대적으로 적다는 것을 의미한다.

4.1.2 계면활성제를 활용한 이산화탄소 주입

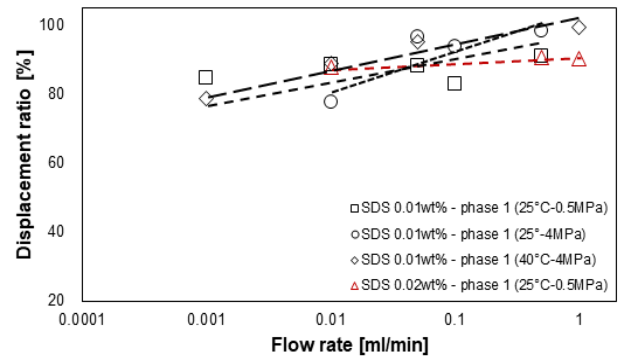
Fig. 9(b), 9(c), 9(d)는 계면활성제를 사용한 경우, 주입속도에 따른 기체, 액체 및 초임계 상태 이산화탄소의 저장 효율을 나타낸다. 느린 주입속도(0.001ml/min)에서 SDS 계면활성제의 활용은 상대적으로 높은 저장 효율의 변화를 보여준다. 하지만 주입속도 증가에 따른 저장 효율 변화는 상대적으로 작게 나타난다.

SDS 계면활성제의 농도(0.01wt% 및 0.02wt%)에 따른 저장 효율 차이도 크게 나타나지 않는다. 예를 들어, 0.001ml/min 주입속도에서 0.01wt% 및 0.02wt% 농도에서의 저장 효율은 각각 83.53% 및 79.91%이다. 이는 적은 양의 계면활성제 사용에도 저장 효율이 이미 크게 나타났기 때문에 판단된다. 실험 결과를 바탕으로 비혼성 유체간 계면장력 감소를 위해 계면활성제의 활용은 필수적이다. 따라서, 계면활성제는 높은 압력이 작용하는 해저 대수층에서 이산화탄소 주입 시 발생하는 모세관 압력 저감에 효과적일 것으로 판단된다.

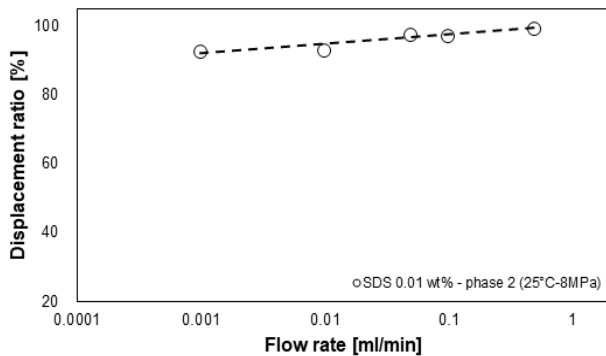
기체 상태 이산화탄소(Fig. 9(b))보다 액체 및 초임계 상태에서 상대적으로 높은 저장 효율이 나타난다. 예를 들어, 느린 주입속도(0.001ml/min)에서 기체 상태보다 액체 상태가 약 10% 높은 저장 효율을 나타내고 있다. 하지만, 상대적으로 빠른 주입속도(1ml/min)에서는 상태에 따른 차이가 미비



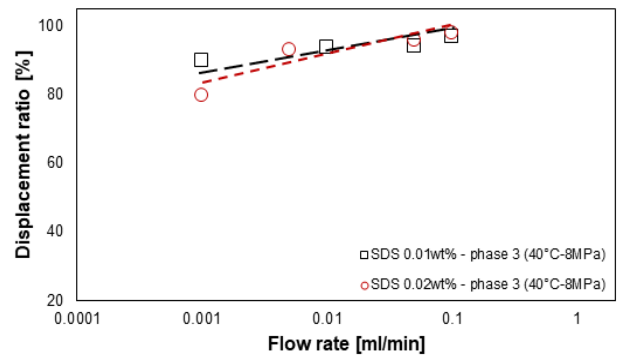
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9. Displacement ratio on carbon dioxide injection flow rate (a) water (b) SDS (gas phase) (c) SDS (liquid phase) (d) SDS (supercritical phase)

하다. 이러한 실험 결과는 주입속도에 따른 저장 효율의 증가로 인한 현상으로 판단된다.

4.2 이산화탄소 상태에 따른 주입효율

Fig. 10은 SDS(0.01wt%) 계면활성제 활용 시 이산화탄소 상태에 따른 저장 효율을 나타낸다. 모든 주입속도 조건에서 기체 상태 이산화탄소 주입에 따른 저장 효율은 액체 및 초임계 상태보다 낮게 나타난다. 그리고 액체 및 초임계 상태 이산화탄소는 유사한 저장 효율을 보여준다. 이는 액체 및 초임계 상태의 이산화탄소가 상대적으로 유사한 분자량을 나타내고, 저장 효율의 향상에 기여한 것으로 판단된다.

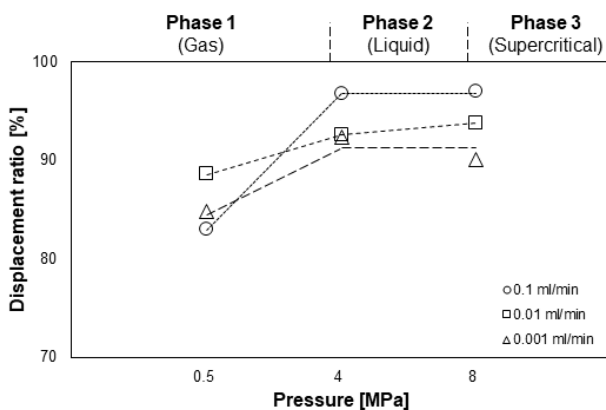


Fig. 10. Displacement ratio of SDS (0.01 wt%) on carbon dioxide phase

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 마이크로모델을 활용한 이산화탄소 상태 및 계면활성제 활용에 따른 저장 효율을 평가하였으며, 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 느린 주입속도에서의 저장 효율은 낮고, 주입속도가 증가할수록 저장 효율은 증가한다. 주입속도에 따른 저장 효율증가는 계면활성제를 사용하지 않은 기체 상태의 이산화탄소 주입에서 가장 크게 나타난다.
- (2) 분자량의 차이로 인해 액체 및 초임계 상태의 이산화탄소 주입은 기체 상태보다 저장 효율이 크게 나타난다. 액체 및 초임계 상태 이산화탄소의 주입속도에 따른 저장 효율 증가는 기체 상태에 비해 크게 나타나지 않는다.
- (3) 계면활성제를 사용한 경우, 모든 상태의 이산화탄소가 느린 주입속도에서도 저장 효율이 크게 나타난다. 따라서, 주입속도에 의한 저장 효율 증진은 미비하게 나타난다.

- (4) 본 연구 조건에서 사용된 계면활성제 농도(0.01wt% 및 0.02wt%)에 따른 저장 효율 차이는 크게 나타나지 않는다.
- (5) 계면활성제의 농도, 주입속도 및 이산화탄소 상태를 모두 고려하여 최적의 이산화탄소 저장 효율 향상을 위한 주입조건의 결정이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 충북대학교 국립대학육성사업(2022) 지원을 받아 작성되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Cao, S. C., Dai, S. and Jung, J. (2016), Supercritical CO₂ and brine displacement in geological carbon sequestration: Micromodel and pore network simulation studies, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 44, 104~114.
2. Chang, C., Kneafsey, T. J., Tokunaga, T. K., Wan, J. and Nakagawa, S. (2021), Impacts of pore network-scale wettability heterogeneity on immiscible fluid displacement: a micromodel study, *Water Resources Research*, 57(9).
3. Finley, R. J., Frailey, S. M., Leetaru, H. E., Senel, O., Couëslan, M. L. and Scott, M. (2013), Early operational experience at a one-million tonne CCS demonstration project, Decatur, Illinois, USA. *Energy Procedia*, 37, 6149~6155.
4. Gang, S. and Jung, J. (2022), Increase of CO₂ injection ratio using surfactants based on the micromodel experiment, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 23(12), 55~61.
5. Global CCS Institute (GCCSI) (2015), *What is CCS?*, Melbourne, Australia.
6. Government of the Republic of Korea, *Korea's 2050 Carbon Neutral Strategy for the Realization of a Sustainable Green Society 2020*. URL: https://www.gihoo.or.kr/netzero/download/LEDS_REPORT.pdf.
7. Gwon, L. G. (2016), Review of CO₂ storage projects and driving strategy of CO₂ storage program in Korea, *KEPCO journal on electric power and energy*, 2(2), 167~185.
8. Ha, M. and Jung, J. (2019), Study of kaolin particle migration and clogging using a micromodel, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 35(4), 37~42.
9. Iglauer, S., Willing, W., Pentland, C. H., Al-Mansoori, S. K. and Blunt, M. J. (2011), Capillary-trapping capacity of sandstones and sandpacks, *Spe Journal*, 16(04), 778~783.
10. Intergovernmental Panel on Climate Change (2005), *Carbon dioxide capture and storage*, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 442.
11. Jackson, R. B., Friedlingstein, P., Le Quéré, C., Abernethy, S., Andrew, R. M., Canadell, J. G. and Peters, G. P. (2022), Global fossil carbon emissions rebound near pre-COVID-19 levels, *Environmental Research Letters*, 17(3), 031001.
12. Jafari, M. and Jung, J. (2017), Direct measurement of static and

- dynamic contact angles using a random micromodel considering geological CO₂ sequestration, *Sustainability*, 9(12), 2352.
13. Jafari, M. and Jung, J. (2019), Salinity effect on micro-scale contact angles using a 2D micromodel for geological carbon dioxide sequestration, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 152~161.
 14. Kang, K., Huh, C. and Kang, S. G. (2015), A numerical study on the CO₂ leakage through the fault during offshore carbon sequestration, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 18(2), 94~101.
 15. 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, 324~332.
 16. Lenormand, R. (1990), Liquids in porous media, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2(S), SA79.
 17. Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H. C., Loos, M. and Meyer, L. (2005), IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, Cambridge: Cambridge University Press.
 18. Park, G., Kim, S. O. and Wang, S. (2021), The effect of the surfactant on the migration and distribution of immiscible fluids in pore network, *Economic and Environmental Geology*, 54(1), 105~115.
 19. Ryou, J. E. and Jung, J. (2022), Characteristics of biopolymer guar gum solution injection for eco-friendly ground reinforcement, *Journal of Korean Hazard and Mitigation*, 22(1), 201~207.
 20. Ryou, J. E. and Jung, J. (2022), Penetration behavior of biopolymer aqueous solutions considering rheological properties, *Geomechanics and Engineering*, 29(3), 259~267.
 21. Tsouris, Costas, Douglas S. Aaron and Kent A. Williams (2010), Is carbon capture and storage really needed?, 4042~4045.
 22. Xie, X. and Economides, M. J. (2009, March), The impact of carbon geological sequestration, Society of Petroleum Engineers, n SPE Americas E&P Environmental and Safety Conference. OnePetro.