

계면활성제 및 이산화탄소 연속 주입을 활용한 탄소 저감 기술

Carbon Reduction Technology Applying the Surfactant and Carbon Dioxide Sequential Injection

강석구¹⁾ · 정종원[†]

Seokgu Gang · Jongwon Jung

Received: February 1st, 2024; Revised: February 7th, 2024; Accepted: February 27th, 2024

ABSTRACT : Promising geological structures for carbon dioxide capture and subsurface storage include aquifers, depleted reservoirs, and gas fields. Among these, aquifers are gaining attention due to their potential for storing significant amounts of carbon dioxide compared to other geological structures. Therefore, there is a growing interest in enhancing carbon dioxide storage efficiency by understanding the characteristics of aquifers and developing technologies tailored to their properties. In this study, the storage efficiency of carbon dioxide injection following surfactant pre-injection into porous micro-models was evaluated. The results indicate that as the concentration of the surfactant solution injected prior to carbon dioxide injection increases, storage efficiency improves. Conversely, lower concentrations require more surfactant injection to enhance storage efficiency. Furthermore, under identical surfactant concentration conditions, the storage efficiency from surfactant pre-injection prior to supercritical carbon dioxide injection is approximately 30% lower compared to surfactant-co-solvent substitution as observed in previous studies. However, under the maximum concentration conditions investigated in this study, similar storage efficiencies to those of previous studies were achieved. These findings are expected to guide concentration determinations for surfactant application aimed at enhancing carbon dioxide storage efficiency in aquifers in future studies.

Keywords : Micromodel, Pre-injection, Surfactant, Supercritical, Carbon dioxide

요지 : 이산화탄소 포집 및 지중 저장을 위해 유망한 지질학적 구조로는 대수층, 폐유전 및 가스전 등이 존재한다. 이 중 대수층은 다른 지질학적 구조에 비해 많은 양의 이산화탄소 저장이 가능한 것으로 판단됨에 따라 그 관심이 증가하고 있으며, 대수층의 특성을 반영하여 이산화탄소 저장 효율 향상을 위한 기술 개발이 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 음이온성 계면활성제를 활용하여 공극수가 존재하는 마이크로모델 내 계면활성제 선 주입 후 초임계 이산화탄소 후속 주입에 따른 이산화탄소 저장 효율 평가를 수행하였다. 그 결과 선 주입되는 계면활성제 수용액의 농도가 증가함에 따라 이산화탄소 저장 효율이 개선되며, 농도가 낮을수록 이산화탄소 저장 효율 개선을 위한 더 많은 계면활성제의 주입이 필요한 것으로 나타난다. 또한 동일한 계면활성제 농도 조건에서 선행 연구의 계면활성제-초임계 이산화탄소 치환보다 계면활성제 선 주입 방식에서 이산화탄소 저장 효율은 약 30% 낮은 값을 나타내며, 본 연구의 최대 농도 조건에서 선행 연구와 유사한 이산화탄소 저장 효율을 나타낸다. 이러한 결과는 향후 대수층 내 이산화탄소 저장 효율 향상을 위한 계면활성제 적용 시 농도 결정에 활용될 것으로 기대된다.

주요어 : 마이크로모델, 선 주입, 계면활성제, 초임계, 이산화탄소

1. 서론

Carbon Capture and Storage(CCS)란 대기 중에 존재하는 온실가스 중 이산화탄소만을 포집한 후 특정 지질학적 구조에 주입함으로써 격리하는 일련의 과정을 의미한다. 이 중 이산화탄소 주입을 위한 지질학적 구조에는 해저 대수층, 채산성이 부족한 유전 및 가스전 등이 존재하는 것으로 알려져 있다. 이러한 지질학적 구조들은 공통적으로 덮개암(cap rock)의 존재가 있으며, 덮개암은 물리적 장벽으로 활용

되어 주입 완료 후 발생할 수 있는 유출 방지에 기여 가능하다(Watson et al., 2003).

특히 미국에서 수행한 저장층의 구조에 따른 이산화탄소 저장 가능량에 따르면, 해저 대수층은 유전 및 가스전 보다 약 100~200배 이상의 이산화탄소 저장이 가능한 것으로 알려져 있다(Gale, 2004). 이렇듯 큰 저장 가능량을 가지는 해저 대수층은 평균적으로 해저 700m 지점에 존재하며(Metz et al., 2005), 저장층의 온도 및 압력 특성에 따라 주입되는 이산화탄소는 기체 상태가 아닌 초임계 상태로 존재할 것으로

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)

판단된다(Peter et al., 2022).

해저 대수층에서 이산화탄소는 위에서 기술한 것과 같이 초임계 상태로 존재할 것으로 예상됨에 따라 유동성 측면에서 액체와 같은 특성을 나타내지만, 동시에 기체의 특성도 보유하고 있다. 기체와 같은 특성으로 인해 해저 대수층에 주입 시 공극에 존재하는 공극수와 이산화탄소는 섞이지 않는 비혼성(immiscible) 유체이다. 해저 대수층과 같은 다공성 매체에서 비혼성 유체 간에는 모세관압력이 작용한다. 모세관압력은 비혼성 유체 각각에 작용하는 압력의 차이로 정의되며, Eq. (1)과 같다(Jang et al., 2016).

$$\Delta P(x) = P_w - P_n = \frac{4\gamma \cos[\theta - \alpha(x)]}{d(x)} \quad (1)$$

위 식에서 $\Delta P(x)$ 는 비혼성 유체 간 압력 차이, γ 는 계면장력, θ 는 접촉각, $\alpha(x)$ 는 공극 표면과 주입 유체의 벽면 접촉각 및 $d(x)$ 는 위치 x 에서의 공극 직경으로, 비혼성 유체 간에 작용하는 계면장력 및 접촉각 개선을 통해 주입 유체의 공극 매체 내 주입 및 이산화탄소 저장 효율 증진이 가능할 것으로 여겨진다(Ansarinassab & Jamialahmadi, 2016; Alnoush et al., 2019).

Eq. (1)에 근거하여 비 혼성 유체 간에 작용하는 계면장력 및 접촉각 개선을 위해 폴리머 및 계면활성제를 활용한 연구들이 수행되고 있다(Postmus, 2008; Levitt et al., 2012; Kathel & Mohanty, 2013; Tokunaga et al., 2013; Cao et al., 2015; Jung & Jong, 2016a; Jung & Hu, 2016b; Jafari & Jung, 2018). Seok et al.(2019)는 베레아 사암 시추 코어의 활용을 통해 주입 거리 증가에 따른 이산화탄소의 포화도 및 비이온성 계면활성제 surfonic POA 25R2 활용 시 상대 유체투과도 변화에 대한 분석을 수행하였다. 그 결과 주입 거리 증가에 따른 이산화탄소 포화도 감소 현상이 나타났으며, 이러한 현상은 주입속도가 클수록 주입 거리 증가에 따른 이산화탄소 포화도가 큰 폭으로 감소하는 경향을 보인다. Surfonic POA 25R2 활용에 따른 상대 유체투과도에서는 계면활성제를 활용하지 않은 경우보다 약 3배 증가한 0.3으로 평가되었다. Park et al.(2019)는 수치 해석을 기반으로 공극수가 존재하는 저장층 규모에서 계면활성제 선행 주입에 따른 이산화탄소 저장 효율을 평가하였다. 그 결과 저장층의 경사가 존재하지 않는 경우 계면활성제 선행 주입은 저장층 압력 감소 및 이산화탄소 주입량을 증가시키는 것으로 도출되었으며, 계면활성제의 주입량과 비례관계를 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 선행연구를 통해 계면활성제와 같은 첨가제의 활용 및 주입속도의 증가가 이산화탄소 저장 효율 증진에 효과적인 것으로 판단된다. 반면 한계점으로는 현재까지 수행된

연구들은 단순히 공극수가 계면활성제 수용액인 경우에서 이산화탄소 저장 효율 평가를 수행하였다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로모델을 활용하여 공극수가 존재하는 저장층의 조건에서 계면활성제 선행 주입 후 후속으로 주입되는 초임계 이산화탄소의 저장 효율 평가를 수행하였으며, 계면활성제는 선행 연구로 사용되었던 음이온성 계면활성제를 활용한다.

2. 실험 재료 및 방법

본 장에서는 연구에 사용된 실험 재료 및 초임계 이산화탄소 주입 시스템을 활용한 실험 방법에 대해 기술한다.

2.1 실험 재료

실험에 사용한 유체로는 크게 공극수, 계면활성제 수용액 및 이산화탄소가 있다. 공극수로는 초순수 탈 이온수를 활용하였으며, 제조를 위해 역삼투압 방식의 정수 장치(human.corp, green RO 350)를 활용하였다. 계면활성제 수용액은 탈 이온수 및 sodium dodecyl sulfate(SDS)를 사용하였으며, SDS 계면활성제의 분자구조 및 기본적인 특성은 Fig. 1 및 Table 1과 같다. SDS 계면활성제는 파우더 형태로 탈 이온수에 마그네틱 교반기를 활용하여 수용액으로 제조하였다. 이산화탄소는 초순수(99.99%) 기체 상태를 활용하였다.

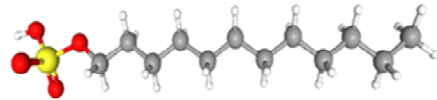


Fig. 1. 3D image of Molecular structure of SDS (National Center for Biotechnology Information, 2023)

Table 1. Physical and chemical properties of SDS

	Sodium dodecyl sulfate
Molecular formula	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$
Molecular weight [g/mol]	288.38
Density [g/cm ³]	0.37
pH	9.1 (at 10g/l)
CAS number	151-21-3

2.2 실험 방법

Fig. 2는 본 연구에서 수행한 고온·고압 조건의 초임계 이산화탄소 주입을 수행하기 위해 구축한 시스템의 모식도를 나타낸다. 마이크로모델(Micronit BV, uniform network)은 silica glass로 이루어진 유리관 사이에 Fig. 3과 같이 균일한 공극이 존재함에 따라 공극 규모에서 유체의 유동 특성에 대한

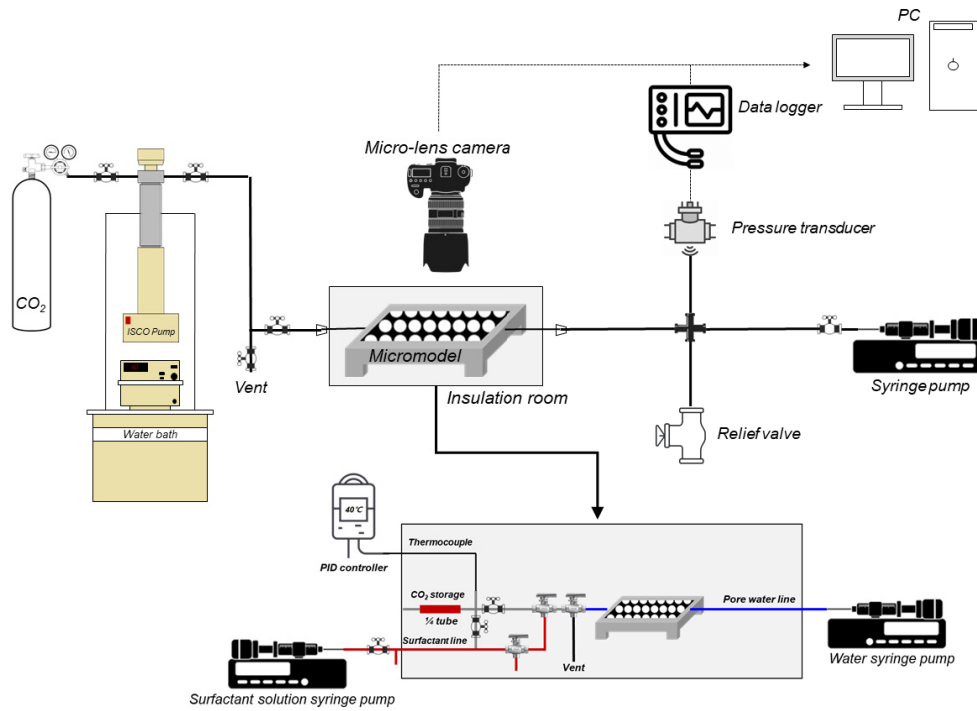


Fig. 2. Schematic diagram of high temperature and high pressure supercritical carbon dioxide injection system

직관적인 분석에 유용한 장비이다. 초임계 이산화탄소의 온도 조건 형성을 위해서는 히팅 자켓(Teledyne, 500x) 및 PID 온도조절 장치(Global Lab, GLTC-DP)가 사용되었다.

특히, 본 연구에서는 기존에 수행되었던 마이크로모델에 실험 조건에 맞는 용액을 주입 후 초임계 이산화탄소를 주입하는 방식이 아닌 계면활성제 선행 주입 방식을 적용하였다. 계면활성제 선행 주입 방식이란, 탈 이온수로 포화된 마이크로모델에(Fig. 4(a)) 실험 조건에 맞게 0.5PV에서 2PV의 계면활성제 수용액을 주입한다(Fig. 4(b)). 이후 0.005mL/min의 속도로 초임계 이산화탄소 주입을 수행한다(Fig. 4(c)). 이러한 계면활성제 선 주입 방식을 통해 본 연구에서는 계면활성제의 농도 및 주입량에 따른 이산화탄소 저장 효율을 평가하고자 하며, 이를 위해 Fig. 2와 같이 insulation room 내부에 3 및 2방향 밸브를 활용하여 계면활성제 선 주입 시스템

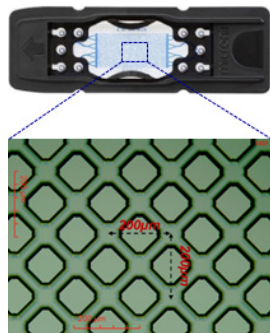


Fig. 3. Experimental pressure and temperature conditions considering phase diagram of carbon dioxide

을 구축하였다. 실험 조건은 Table 2와 같다.

계면활성제 선 주입 후 초임계 이산화탄소의 주입이 완료된 이미지는 microlens camera(Nikon D7000, 16.2 megapixels)를 통해 기록되었으며, image J를 활용하여 Gang et al.(2024)에 기술된 것과 같이 일련의 이미지 처리 과정을 통해 정량적인 초임계 이산화탄소 저장 효율을 산정하였다(Ryou & Jung 2021; Ryou & Jung 2022).

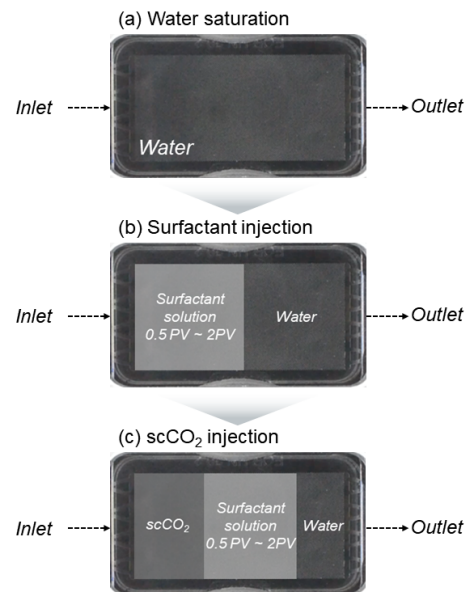


Fig. 4. Schematic of the water-surfactant-scCO₂ injection in the micromodel (a) water saturation (b) pre injection of surfactant solution (c) scCO₂ injection

Table 2. Water–surfactant–supercritical carbon dioxide injection condition

Surfactant	Surfactant concentration [wt%]	Surfactant injection volume [PV=2.1μL]	Surfactant volumetric injection flow rate [mL/min]	Supercritical carbon dioxide volumetric injection flow rate [mL/min]
Sodium dodecyl sulfate	0.01	1	1	0.005
			0.5	
	0.05	2	0.05	
			0.01	
			0.005	

3. 실험 결과

본 장에서는 이미지 처리를 통해 도출된 결과를 바탕으로 주입 패턴에 대한 분석, 선 주입되는 계면활성제 수용액의 주입속도 및 주입량에 따른 이산화탄소 저장 효율에 관해 기술한다.

3.1 계면활성제 선 주입 시 이산화탄소 주입 패턴

Fig. 5는 선 주입되는 SDS 계면활성제의 주입량에 따른

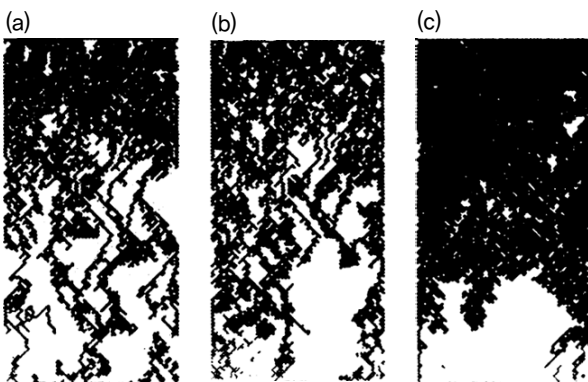


Fig. 5. Image processing result, On the injected volume of the 0.01 wt% solution (surfactant injection flow rate: 0.01 mL/min; supercritical carbon dioxide injection flow rate: 0.005 mL/min) (a) 0.5 PV (b) 1 PV (c) 2 PV

이산화탄소 주입 패턴 변화를 나타낸다. 그림에서 흑색은 주입된 초임계 이산화탄소를 나타내며 백색은 공극수(탈 이온수) 또는 선 주입된 계면활성제 수용액을 의미한다. Fig. 5(a)에서 초임계 이산화탄소는 주입부 부근에서는 포화도가 높게 나타나지만, 주입 거리가 점차 증가함에 따라서 핑거링(fingering) 현상이 발생하며, 포화도가 급격히 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 경향은 Fig. 5(b)의 계면활성제 수용액 주입량이 1PV인 경우에서도 유사하게 나타나며, 반면 Fig. 5(c)에서 주입량이 2PV로 증가함에 따라 전체 주입 거리 중 약 50% 부근까지 흑색의 초임계 이산화탄소가 균일하게 주입된다. 따라서, 동일한 주입속도 및 농도 조건에서 주입량 증가를 통해 공극 매체 내 초임계 이산화탄소의 포화도 증가가 가능할 것으로 판단된다.

3.2 계면활성제 주입속도에 따른 이산화탄소 저장 효율 변화

Fig. 6은 선 주입되는 계면활성제 수용액의 주입속도에 따른 이산화탄소 저장 효율의 변화를 나타낸다. Fig. 6(a)는 계면활성제 주입량이 1PV인 경우로, 계면활성제 수용액 농도가 0.01wt%, 0.05wt% 및 0.12wt%인 모든 경우에서 주입속도 증가에 따른 이산화탄소 저장 효율 변화는 미비하게 나타난다. 특히, 계면활성제 농도가 0.01wt%인 경우 주입속도

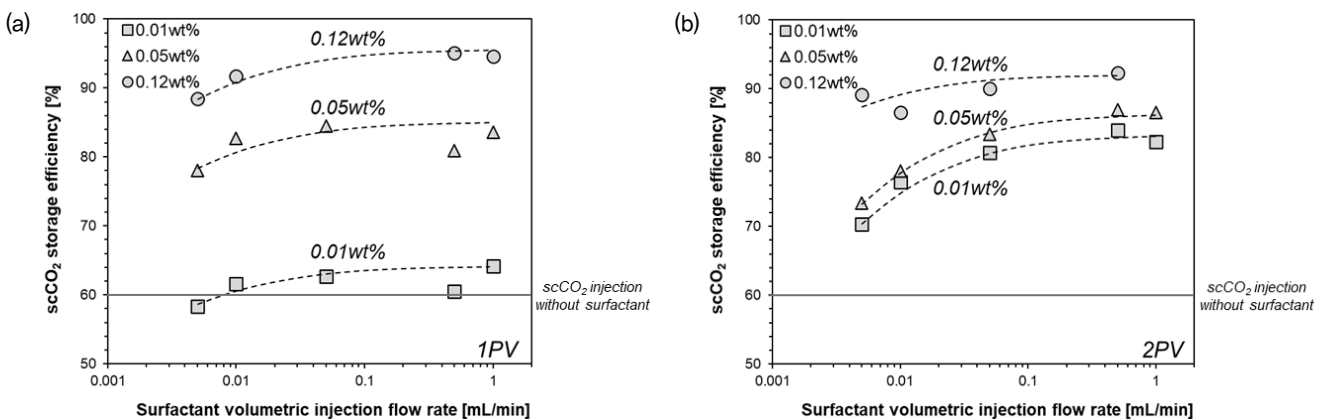


Fig. 6. Supercritical carbon dioxide storage efficiency on the surfactant volumetric injection flow rate. According to the water–SDS–supercritical carbon dioxide injection (a) 1 PV injection (b) 2 PV injection

에 따른 이산화탄소 저장 효율은 선행 연구(Gang et al., 2024)의 계면활성제가 활용되지 않은 경우의 이산화탄소 저장 효율인 약 60%와 유사한 경향을 나타내었다. 계면활성제 농도가 0.01wt%에서 0.05wt%로 5배 증가함에 따라 0.005mL/min 계면활성제 주입속도에서 이산화탄소 저장 효율은 58.38%(0.01wt%)에서 78.08%(0.05wt%)로 약 20% 증가하며, 계면활성제 농도가 0.12wt%인 경우에는 88.47%(0.005mL/min)의 이산화탄소 저장 효율을 나타낸다. 0.12wt% 농도 조건에서 계면활성제 주입속도에 따른 이산화탄소 저장 효율은 0.5 mL/min에서 최대 효율(95.11%)을 나타내며, 이후 1mL/min에서 유사한 이산화탄소 저장 효율(94.61%)을 나타낸다. 특히, 계면활성제 주입속도 증가에 따른 초임계 이산화탄소 저장 효율 변화는 미비하게 나타나며, 높은 수준의 초임계 이산화탄소 저장 효율 달성을 위해 주입되는 계면활성제 농도 증가가 효과적일 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 계면활성제 주입량이 2PV인 경우로, 0.01wt%에서 주입 속도가 0.005mL/min(70.3%)에서 1mL/min(82.34%)로 증가함에 따라 이산화탄소 저장 효율은 약 12% 증가한다. 0.05wt%에서는 주입속도에 따른 이산화탄소 저장 효율 증가가 주입량이 1PV인 경우보다 분명하게 나타나며, 73.42%(0.005mL/min)에서 86.56%(1mL/min)으로 약 13% 증가한다. 계면활성제 농도 0.12wt%는 주입속도에 따른 이산화탄소 저장 효율이 주입량이 1PV인 경우와 유사하게 나타난다.

3.3 주입량에 따른 초임계 이산화탄소 저장 효율

Fig. 7은 계면활성제의 주입량에 따른 이산화탄소 저장 효율의 변화를 나타낸다. Fig. 7(a)의 0.01wt%에서 주입량 0.5PV 및 1PV는 유사한 이산화탄소 저장 효율을 나타내지만, 2PV로 증가함에 따라 76.46%의 이산화탄소 저장 효율로 0.05wt% 계면활성제와 유사하다. 계면활성제 농도 0.05wt%에서는 0.5PV(68.25%)에서 1PV(82.71%)로 증가함에 따라 약 14% 증가 후 수렴하는 경향을 보인다. 0.12wt%에서는 평균 90.77%의 이산화탄소 저장 효율을 나타내며, 모든 주입량에서 10% 오차 이내의 이산화탄소 저장 효율을 나타낸다.

Fig. 7(b)는 계면활성제 주입속도가 0.05mL/min인 경우 주입량에 따른 이산화탄소 저장 효율을 의미한다. 전체적으로 각 농도에서의 주입량 증가에 따른 경향은 계면활성제 주입속도 0.01mL/min과 유사하게 나타나며, 0.01wt%는 주입량이 1PV(62.69%)에서 2PV(80.69%)로 증가함에 따라 약 18%의 이산화탄소 저장 효율 개선이 나타난다. 0.05wt%는 0.5PV에서 1PV로 주입량 증가에서 약 12%의 이산화탄소 저장 효율 증가 후 수렴하는 경향은 나타나며, 이후 수렴하는 경향은 계면활성제 주입속도 0.01mL/min과 유사함을

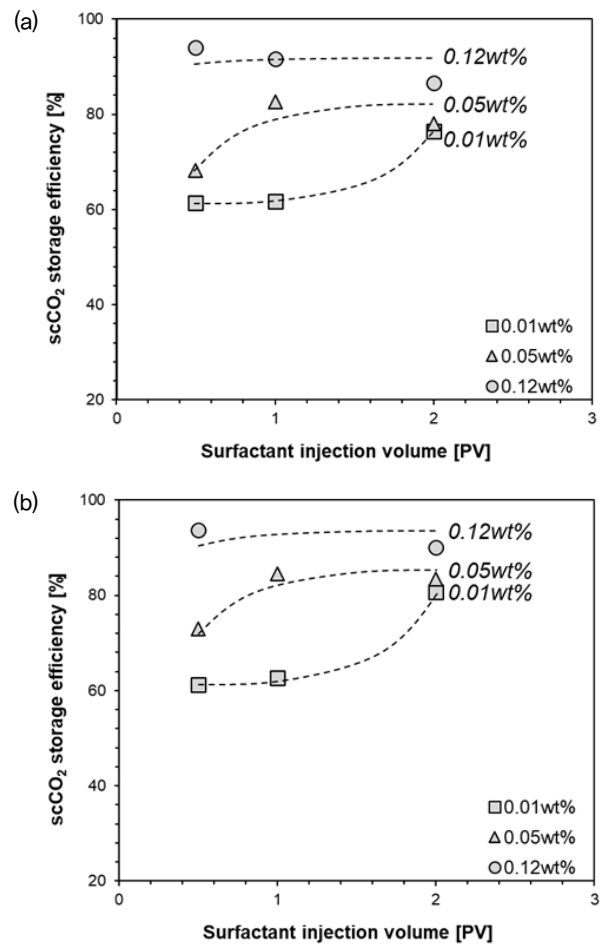


Fig. 7. Supercritical carbon dioxide storage efficiency on the surfactant injection volume. According to the surfactant injection volumetric flow rate (a) 0.01 mL/min (b) 0.05 mL/min

보인다. 또한, 0.12wt%는 0.5PV에서 2PV로의 주입량 증가에 따라 유사한 이산화탄소 저장 효율을 나타낸다. 따라서, 대수층 조건에서 계면활성제 선 주입 시 초임계 이산화탄소의 저장 효율 개선을 위해서는 계면활성제의 농도가 낮을 수록 더 많은 양의 계면활성제 주입이 필요할 것으로 판단된다.

4. 실험 결과 분석

4.1 계면활성제 주입 방식에 따른 이산화탄소 저장 효율

Fig. 8은 계면활성제의 농도에 따른 초임계 이산화탄소의 저장 효율을 나타낸다. 계면활성제 선 주입 방식을 통한 이산화탄소 저장 효율은 농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내며, 그 증가량은 최소 64.19%에서 최대 94.61%로 약 30% 증가한다. 반면, 동일한 농도에서 계면활성제 주입 속도 증가에 따른 이산화탄소 저장 효율 증가량은 상대적으로

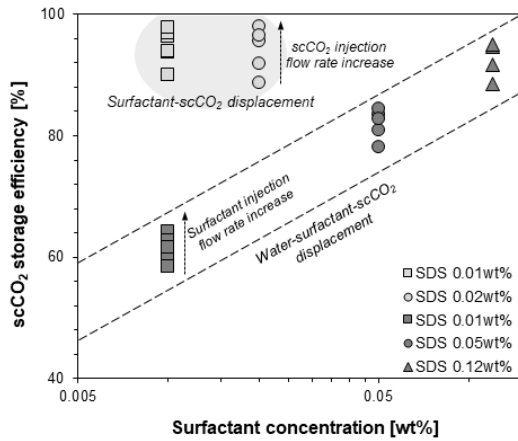


Fig. 8. Comparison the supercritical carbon dioxide storage efficiency according to the injection method

미비하게 나타난다.

공극수가 존재하는 대수층 조건에서 이산화탄소 저장 효율 평가를 위해 공극 규모 계면활성제 선 주입 방식 적용 시 이산화탄소 저장 효율 향상 정도 평가를 위해, 공극수가 계면활성제 수용액인 경우에서 초임계 이산화탄소 주입을 수행한 선행 연구 결과와의 비교 및 분석은 다음과 같다. 선행 연구의 계면활성제-초임계 이산화탄소(surfactant-scCO₂) 치환에 따른 이산화탄소 저장 효율은 0.01wt%에서 초임계 이산화탄소 주입속도 증가에 따라 90.06%에서 97.84%이며, 0.02wt%인 경우에는 88.78%~98%로 유사하다(Gang et al., 2024). 동일한 0.01wt% 농도에서 계면활성제 선 주입 방식 적용 시 이산화탄소 저장 효율은 58.38%~64.19%로, 약 32% 감소한다. 이러한, 이산화탄소 저장 효율의 감소는 계면활성제 농도가 0.12wt%인 수용액 선 주입 시 극복이 가능하며, 그 결과 88.47%~94.61%로 선행 연구의 계면활성제-초임계 이산화탄소(surfactant-scCO₂) 치환법과 유사한 이산화탄소 저장 효율을 나타낸다.

따라서, 대수층 조건에서 계면활성제 선 주입을 통한 초임계 이산화탄소 저장 시 공극 내에서 주입되는 계면활성제와 공극수 간의 희석에 의한 농도 저감을 고려한 계면활성제 수용액의 농도 결정이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 2차원 마이크로모델을 활용하여 대수층 조건에서 계면활성제 선 주입 후 초임계 이산화탄소 주입에 따른 이산화탄소 저장 효율을 평가하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 동일한 계면활성제 주입속도 조건에서 주입량 변화에 따른 이산화탄소 주입 패턴은 모든 주입량 조건에서 주입부 부근 주입 양상은 균일하게 나타난다. 반면 계면활성제 주입량이 감소함에 따라 이산화탄소가 균일하게 주입되는 거리가 감소하며, 이산화탄소 저장 효율이 급격히 감소하는 경향을 나타낸다.
- (2) 선 주입되는 SDS 계면활성제 수용액의 주입량이 동일한 경우, 농도가 증가함에 따라 높은 이산화탄소 저장 효율을 나타내고 선 주입되는 계면활성제의 주입속도 증가에 따른 이산화탄소 저장 효율 차이는 미비하게 나타난다.
- (3) SDS 계면활성제의 선 주입속도가 동일한 경우에는 주입량 증가에 따라 이산화탄소 저장 효율이 증가하며, 농도가 낮을수록 이산화탄소 저장 효율 증가에 더 많은 주입량이 요구된다.
- (4) 선행연구에서 수행한 계면활성제-초임계 이산화탄소 치환에 따른 이산화탄소 저장 효율과 계면활성제 선 주입 방식의 이산화탄소 저장 효율 비교 시 동일한 농도 조건에서는 현격히 감소한다. 반면 본 연구에서 수행한 최대 계면활성제 농도 조건에서는 선행연구와 유사한 이산화탄소 저장 효율을 나타내는 것으로 판단된다.
- (5) 따라서, 실제 대수층으로의 이산화탄소 주입 및 저장 효율 향상 방안으로 계면활성제 활용 시 최적의 농도 조건에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2021201020010)이며, 이에 감사드립니다.

References

1. Alnoush, W., Sayed, A. and Alyafei, N. (2019), Optimization of contact angle and interfacial tension measurements for fluid/rock systems at ambient conditions, *MethodsX*, 6, 1706~1715.
2. Ansarinassab, J. and Jamialahmadi, M. (2016), Investigating the effect of interfacial tension and contact angle on capillary pressure curve, using free energy Lattice Boltzmann Method, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 1146~1157.
3. Cao, S., Dai, S. and Jung, J.W. (2015), Supercritical CO₂ and Brine Displacement in Geological Carbon Sequestration, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 44, pp. 104~114.
4. Gale, J. (2004), Geological storage of CO₂: What do we know,

- where are the gaps and what more needs to be done, *Energy*, 29(9-10), 1329~1338.
5. Gang, S., Ryou, J. E., Lee, J. Y. and Jung, J. (2024), Enhancement of carbon dioxide storage efficiency using anionic surfactants, *Fuel*, 358, 129998.
 6. Jafari, M. and Jung, J. (2018), Variation of contact angles in brine/CO₂/mica system considering short-term geological CO₂ sequestration condition, *Geofluids*, 2018.
 7. Jang, J., Sun, Z. and Santamarina, J. C. (2016), Capillary pressure across a pore throat in the presence of surfactants, *Water Resources Research*, 52(12), 9586~9599.
 8. Jung, J. and Jong, W. H. (2016), Impact of pressure and brine salinity on capillary pressure-water saturation relations in geological CO₂ sequestration, *Advances in Condensed Matter Physics*, DOI: 10.1155/2016/5603739.
 9. Jung, J. and Hu, J. W. (2016), Impact of pressure and brine salinity on capillary pressure-water saturation relations in geological CO₂ sequestration. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2016.
 10. Kathel, P. and Mohanty, K. K. (2013), EOR in tight oil reservoirs through wettability alteration, In SPE annual technical conference and exhibition. OnePetro.
 11. Levitt, D. B., Dufour, S., Pope, G., Morel, D. and Gauer, P. (2012), Design of an ASP flood in a high-temperature, high-salinity, low-permeability carbonate, In IPTC 2012: International petroleum technology conference (pp. cp-280). European Association of Geoscientists & Engineers.
 12. 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.
 13. National Center for Biotechnology Information (2023), PubChem Compound Summary for CID 3423265, Sodium dodecyl sulfate, Retrieved September 13, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-dodecyl-sulfate>
 14. Park, Y. C., Kim, S., Lee, J. H. and Shinn, Y. J. (2019), Effect of reducing irreducible water saturation in a near-well region on CO₂ injectivity and storage capacity, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 86, 134~145.
 15. 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*, 12(4), 168.
 16. Postmus, B. R. (2008), Polymer vs. surfactant: competitive adsorption at the solid-liquid interface, Wageningen University and Research.
 17. Ryou, J. E. and Jung, J. (2021), The Fundamental Study on Penetration Behavior of Biopolymer Solution for Ground Reinforcement.
 18. 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.
 19. Seok, G. B., Park, Y. C., Lee, J. Y., Lee, Y. K., Kim, K. Y., Son, H. and Raab, M. (2023), Impact of surfactants on CO₂-brine relative permeability under reservoir conditions, *Energy Reports*, 9, 3755~3770.
 20. Tokunaga, T., Wan, J., Jung, J.W., Kim, T. K., Kim, Y. and Dong, W. (2013), Capillary pressure and saturation relations for supercritical CO₂ and brine in sand: High-pressure Pc(Sw) controller/meter measurements and capillary scaling predictions, *Water Resources Research (AGU)*, Vol. 49, pp. 1~14.
 21. Watson, M. N., Zwingmann, N. and Lemon, N. M. (2003, January), The Ladbroke Grove-Katnook carbon dioxide natural laboratory: A recent CO₂ accumulation in a lithic sandstone reservoir. In *Greenhouse Gas Control Technologies-6th International Conference* (pp. 435~440). Pergamon.