

# 마이크로모델 실험 기반 계면활성제를 활용한 이산화탄소 주입효율 향상

## Increase of CO<sub>2</sub> Injection Ratio Using Surfactants Based on the Micromodel Experiment

강석구<sup>1)</sup> · 정종원<sup>†</sup>  
Seokgu Gang · Jongwon Jung

Received: November 8<sup>th</sup>, 2022; Revised: November 15<sup>th</sup>, 2022; Accepted: November 23<sup>rd</sup>, 2022

**ABSTRACT** : Carbon dioxide is one of the greenhouse gases in the atmosphere and much research is underperforming in reducing carbon dioxide. Geological carbon dioxide storage is considered the primary technique for global warming prevention. So, technic development for storing carbon dioxide is required. Using surfactant is considered an effective material for geological carbon dioxide storage. However, research on using surfactants for carbon dioxide sequestration is not enough. In this study, a 2D micromodel experiment depends on the surfactant type (sodium dodecyl sulfate and sodium dodecylbenzene sulfonate), concentration and carbon dioxide injection rate. As result, geological carbon dioxide sequestration efficiency is increased according to surfactant concentration and carbon dioxide injection rate increase. However, efficiency no more increases after critical concentration and rate.

**Keywords** : Micromodel, Surfactant, Carbon sequestration, Image analysis

**요지** : 대기 중 온난화 가스의 하나인 이산화탄소 감소를 위해 많은 연구들이 수행 중이다. 이 중 이산화탄소 지중저장은 지구 온난화 방지를 위한 중요한 공법 중 하나로 주목받고 있다. 하지만, 제한된 공간의 최대한 많은 양의 이산화탄소 저장을 위한 기술의 개발이 필요한 실정이다. 계면활성제의 활용은 이산화탄소 지중저장 효율의 향상에 기여할 것으로 여겨지고 있으나, 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 이산화탄소 지중저장 효율 증진을 위해 계면활성제 종류(sodium dodecyl sulfate 및 sodium dodecylbenzene sulfonate) 및 농도, 이산화탄소 주입속도에 따른 2차원 마이크로모델 실험을 수행하였다. 그 결과, 계면활성제의 농도 및 이산화탄소 주입속도가 증가할수록, 이산화탄소 지중저장 효율이 증가함을 확인하였다. 하지만, 한계 농도 및 속도 이상에서는 더 이상 효율 증진이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

**주요어** : 마이크로모델, 계면활성제, 이산화탄소, 지중 저장, 이미지 처리

## 1. 서론

인류는 산업혁명 이래 화석 연료를 활용한 발전 과정에서 다량의 이산화탄소(carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) 배출을 일으키고 있다(Fig. 1). 이러한 화석 연료는 추후 수십 년간 주요한 에너지원의 하나로 여겨지고 있다(Tsouris et al., 2010; Xie & Economides, 2009). 지속적인 화석 연료의 사용은 대기 중 이산화탄소 농도의 증가를 유발하고, 지구 온난화의 위기를 일으키고 있다. 지구 온난화에 따른 기후 위기는 해수면 상승, 홍수 및 폭염 등이 존재한다. Table 1은 전 지구 온도 상승에 따른 생태계 및 인간 생활권에 미치는 영향을 나타내고 있다.

이러한 기후 위기의 심각성이 대두됨에 따라 국제 사회는 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel

on Climate Change, IPCC) 및 파리 기후협약을 통해 탄소 배출량 조절을 위해 국가별 감축량을 결정하고 합의하였다. 이에 따라, 국내에서도 이산화탄소 배출량 감축을 위한 2050



Fig. 1. Annual CO<sub>2</sub> emission of world (united nations environment programme, 2021)

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](mailto:jjung@chungbuk.ac.kr))

Table 1. Comparison of main effects of global temperature rise 1.5°C vs 2°C (IPCC, 2018)

	1.5°C	2°C
Ecosystems and humans	High risk	Very high risk
Mid-latitude heatwave temperature	3°C increase	4°C increase
High latitude cold wave temperature	4.5°C increase	6°C increase
Coral extinction	70~90%	≤99%
Population vulnerable to climate impact and poverty	Up to hundreds of millions more by 2050 at 2°C	
Water scarce population	Up to 50% increase at 2°C	
Risk of large-scale extreme events	Medium risk	Medium to high risk
Sea level rise	0.26~0.77m	0.3~0.93m
Frequency of complete extinction of arctic sea ice	Once in 100 years	Once in 10 years

탄소중립 정책을 수립하고 이산화탄소 포집 및 활용·저장 (Carbon Capture and Utilization·Storage, CCUS) 기술의 실현 방안을 마련하였다. CCUS는 대규모 이산화탄소 배출원에서 포집된 이산화탄소를 해저 심부 대수층에 저장하는 기술을 포함한다(Fig. 2)(Benson & Surles, 2006; White et al., 2005). 지중 저장을 위한 대수층 조건은 일반적으로 덮개암이 존재하는 해저 800m 지점이 적합한 것으로 알려져 있다(Kwon, 2016; GCCSI, 2015; IPCC, 2005). 이산화탄소를 심부 염수층에 주입할 때 염수와 이산화탄소 사이에서 높은 계면장력이 발생하고, 이는 모세관 압력 증가 및 이산화탄소 주입·저장 효율 감소를 유발한다(Cao et al., 2016; Jafari & Jung, 2017; 2019).

계면활성제 및 바이오폴리머의 활용을 통해 모세관 압력의 저하 및 주입효율 향상을 위한 연구가 많이 수행되었다. 특히, 유체의 주입효율 향상연구를 위해 마이크로모델을 활용한 주입 연구가 활발히 수행되었다. 이러한 이유로 마이크로모델은 다양한 지반구조 모사 및 극한의 지반 조건

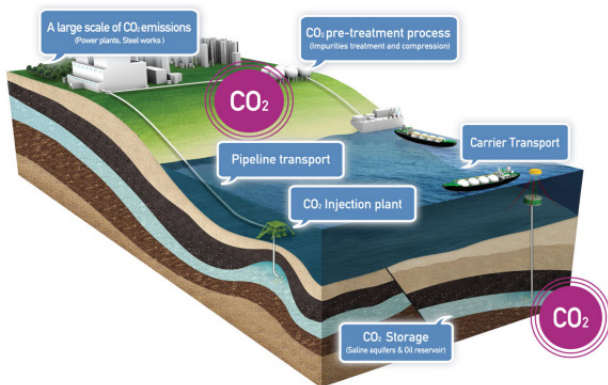


Fig. 2. Schematic of geological carbon storage (Gim et al., 2013)

(온도, 압력)에서 공극 유체 흐름 관찰이 가능하다(Park et al., 2021; Zhong & Mayer, 2001; Ryou & Jung, 2022(a); Ryou & Jung, 2022(b); Kim & Santamarina, 2014). 하지만 대부분의 연구는 바이오폴리머 및 비이온성 계면활성제에 집중되어 있고, 음이온성 계면활성제를 활용한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로모델을 활용한 주입실험을 기반으로 실험 결과 이미지 분석 기술 및 음이온 계면활성제를 활용한 이산화탄소 저장 성능향상을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 계면활성제의 물리·화학적 특성

계면활성제(surfactant)는 친수기(Hydrophilic)와 소수기(Hydrophobic)로 구성된 화합물로서 서로 다른 성질을 가진 물질의 계면에 작용하는 에너지를 감소시킨다. 이러한 에너지 변화는 계면장력을 감소시키고 비혼성(immiscible) 물질을 혼성(miscible) 상태로 전환시킨다.

임계미셀농도(Critical Micelle Concentration, CMC), 친수성-친유성 밸런스(Hydrophilic-Lipophilic Balance, HLB) 및 친수성-이산화탄소 친화성 밸런스(Hydrophilic-Carbon dioxide philic Balance, HCB)는 계면활성제의 특성을 나타내는데 활용된다.

낮은 농도의 계면활성제 분자는 수용액 표면과 수중에 분산된 상태로 존재한다. 따라서, 계면활성제 농도가 증가함에 따라 수용액 표면의 계면활성제 분자수는 증가하고, 이는 계면장력의 감소를 유발한다. 하지만, 계면활성제의 농도가 일정 농도 이상이 되면 수용액 표면에서 계면활성제는 포화되고, 수중에서의 계면활성제 분자는 바깥쪽으로 친수기, 안쪽으로 소수기를 나타내는 형태로 존재하게 된다. 이때, 계면장력은 더 이상 감소하지 않고, 이때의 계면활성제 농도를 CMC라고 한다(Fig. 3).

HLB는 계면활성제 친수성 분자의 총 분자량( $M_h$ )을 전체 분자량( $M$ )으로 나눈 값으로 정의된다. 따라서, HLB가 낮을수록 계면활성제의 친유성은 증가하고, 이러한 계면활성제는 원유회수증진(Enhanced Oil Recovery, EOR) 산업에서 원유 회수율 증가를 위해 활용된다(Massarweh & Abushaikha, 2020).

HCB는 이산화탄소(C), 계면활성제 소수기(T), 계면활성제 친수기(H) 및 물(W) 간 상호작용 에너지( $A_{ij}$ )로 표현된다(Dickson et al., 2005). HCB 값의 결정은  $A_{HW}$ (계면활성제 친수기와 용매간 상호작용에너지)에서  $A_{HH}$ (계면활성제

Table 2. Advantage and mechanism on surfactants ionic characteristic (Negin et al., 2017)

	Cationic	Anionic	Non-ionic	Amphoteric
Advantage	Cationic and nonionic surfactants mixture is most effective agent for EOR	Effective for sandstone reservoir	Effective for surfactant flooding in high salinity water or hard water	Strong electrolyte tolerance, temperature resistance, thermo stability, better wetting and foaming
Electrical interaction of reservoir pore surface	Carbonate surfaces have both cation and anion exchange sites	Sandstone surfaces have anion sites	Not effected by reservoir surface charge	-
Mechanism	Reducing IFT and wettability alteration	Reducing IFT	Reducing IFT	Reducing IFT and wettability alteration

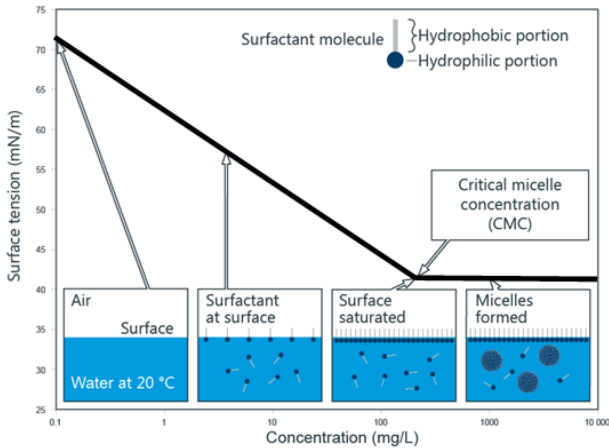


Fig. 3. Surface tension of a surfactant solution with increasing concentration, formation of micelles (Houbraken, 2018)

친수기 간 상호작용에너지) 및  $A_{ww}$ (용매 간 상호작용에너지) 차이를  $A_{TC}$ (계면활성제 소수기와 이산화탄소 간 상호작용에너지)에서  $A_{TT}$ (계면활성제 친수기 간 상호작용에너지) 및  $A_{CC}$ (이산화탄소 간 상호작용에너지) 차로 나눈 값으로 결정된다. 여기서,  $A_{HW}$ 와  $A_{TC}$ 는 각각 물은 계면활성제 친수기와 상호작용하고, 이산화탄소는 소수기와 작용함을 나타낸다.

높은 HCB 값은 계면활성제가 이산화탄소보다 물에 용해가 잘됨을 나타낸다. 따라서, HCB 증가에 따라 계면활성제 친수성은 증가하고, 계면활성제는 균형 상태에 도달한다. 이에 따라, 계면활성제는 물과 이산화탄소에 친화성을 나타내고 계면장력은 최솟값에 도달한다.

## 2.2 친수기 전하에 따른 계면활성제 특성

계면활성제는 친수기 전하 상태에 따라 음이온성, 양이온성, 비이온성 및 양친매성 계면활성제로 분류된다(Fig. 4). 지반에 계면활성제를 주입하면 계면활성제의 친수기 전하 특성은 흡 입자와 상호작용에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Azam et al., 2013; Mohammed et al., 2021). 이러한 상호작용을 고려하여 원유 생산량 증진을 위한 EOR 분야

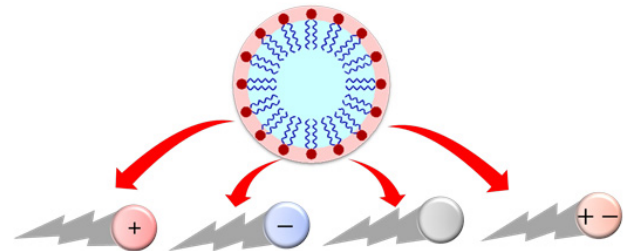


Fig. 4. Surfactant classification on ionic characteristic

에서는 다양한 계면활성제의 활용이 연구되어왔다(Table 2). 위와 같은 선행연구의 결과를 고려하여 CCUS에 적합한 계면활성제를 선정하고자 한다.

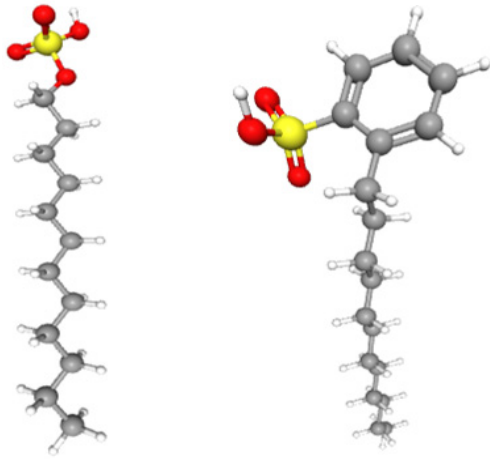
## 3. 실험재료 및 방법

### 3.1 실험 재료

본 연구에서는 실험재료로 탈 이온수(deionized water, DI), 계면활성제 및 이산화탄소를 사용하였다. 탈 이온수의 전기 전도도는  $1\sim 30\mu S/cm$  로서, 역삼투 방식의 초순수 정수 장치(human.corp, green RO 350)를 사용하여 제조되었다. 음이온성 계면활성제로서 본 연구에 활용된 sodium dodecyl sulfate (SDS) 및 sodium dodecylbenzene sulfonate(SDBS)의 특성과 분자구조는 Table 3 및 Fig. 5와 같다. SDBS는 SDS에 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbon) 중 하나인 벤젠(benzene,  $C_6H_6$ )이 추가된 구조를 형성하고 있다. 실험 조건에 따른 계면

Table 3. Physical and chemical properties of surfactant

	SDS	SDBS
Molecular formula	$C_{12}H_{25}O_4SNa$	$C_{18}H_{29}NaO_3S$
Molecular weight [g/mol]	288.38	348.48
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	0.37	1 (at 20°C)
pH	9.1 (at 10g/l)	7 ~ 10.5 (at 25°C)
CAS number	151-21-3	25155-30-0



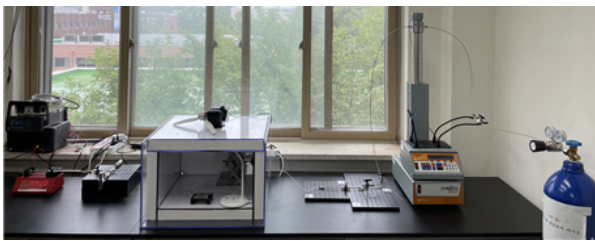
(a) SDS (b) SDBS

Fig. 5. Molecular structure of surfactant use in this study

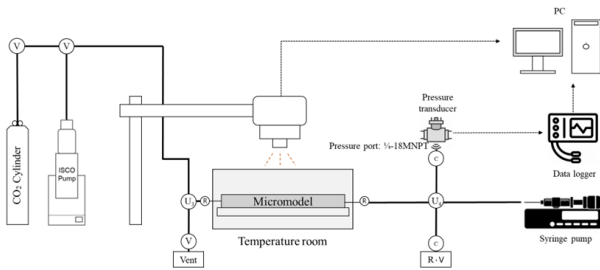
활성제 수용액은 중량비(wt%)에 따라 마그네틱 교반기를 사용하여 침전물이 남지 않도록 교반하였다.

### 3.2 실험 장비 및 방법

본 연구에서 수행한 실험 시스템은 Fig. 6과 같다. Micronit BV에서 제작한 균일한 공극 구조(uniform network)를 가진 마이크로모델(micromodel)을 사용하였다. 공극수의 주입은 고압 주사기(stainless steel syringe)(KD scientific, 2.5mL, 1/16 Swagelok tube fitting) 및 펌프(syringe pump)(new era pump systems.inc, NE-1010)를 활용하여 수행되었다. 공극수 및 이산화탄소의 주입과정 모니터링을 위해 마이크로렌즈 카메라(Nikon D7000, 16.2 Megapixels)를 설치하고, 컴퓨터를 활용해 제어하였다.



(a) Pictorial view



(b) Schematic view

Fig. 6. Experiment set up of micromodel system

이산화탄소 주입실험 수행 과정은 다음과 같다. 마이크로 모델 공극에 에탄올 및 DI를 반복 주입하여 청소한 후, 마이크로모델을 120°C에서 24시간 동안 건조하였다. 본 실험을 위해 중량비(wt%)에 따라 마그네틱 교반기로 침전물이 남지 않도록 교반하여 계면활성제 수용액(SDS or SDBS)을 준비하였다. 주사기를 활용하여 마이크로모델에 계면활성제 수용액을 주입하여 공극을 포화시켰다. 이때, 마이크로모델 주변의 대기 온도 및 압력은 상온(°C) 및 대기압 조건이다. 이후 가압된 이산화탄소는 일정한 속도(0.1~1mL/min)로 마이크로모델 내부로 주입되었다. 본 연구에 적용된 계면활성제 농도 및 이산화탄소 주입속도는 Table 4와 같다.

모든 주입과정은 영상으로 촬영되고, 실험이 완료된 후 이미지를 획득하여 image j를 통해 치환율을 계산하였다. 이미지 처리 과정은 Fig. 7과 같다. 계면활성제 수용액으로 포화 및 이산화탄소 주입 완료 후 이미지(Fig. 7(a) and 7(b))의 차이점 추출을 수행한다(Fig. 7(c)). 이후 밝기 보정을 위한 대비 조절(Fig. 7(d)), 외부 빛 영향 제거를 위한 bandpass filter 적용(Fig. 7(e))하여 이미지의 해상도를 높였다. 이후, threshold

Table 4. Experiment condition of CO<sub>2</sub> injection flow rate

	Water	SDS		SDBS	
		0.01	0.02	0.01	0.02
Flow rate [mL/min]	1	0.5	1	1	1
	0.5	0.1	0.5	0.5	0.1
	0.1	0.05	0.01	0.05	0.01
	0.05	0.01		0.01	
	0.01				

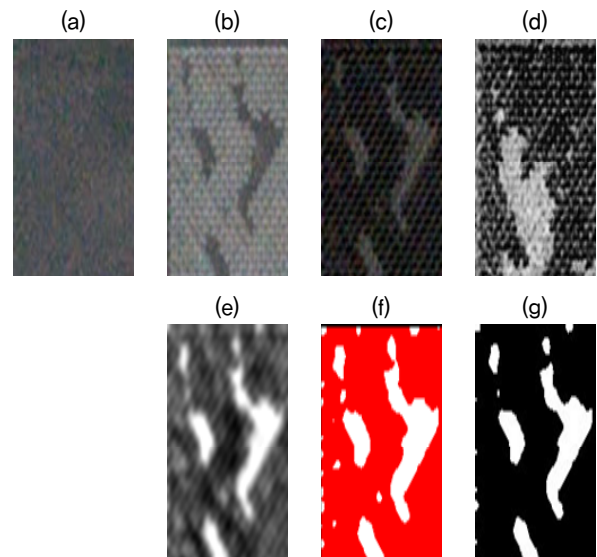


Fig. 7. Procedure of image processing using image j (a) image of saturated with solution (b) CO<sub>2</sub> injected image (c) abstract difference between (a) and (b) image (d) adjusting contrast of abstracted image (e) apply bandpass filters (f) apply threshold (g) apply binary and calculate ratio of black or white area

를 통해 이미지 픽셀에 따른 이미지 이원화를 수행하고(Fig. 7(f)), 면적 계산을 위한 흑백 이진화(binary)를 통해 치환율을 계산하였다(Fig. 7(g)).

## 4. 실험 결과

### 4.1 농도에 따른 치환율 변화

Fig. 8은 계면활성제 종류 및 농도에 따른 이산화탄소 주입 완료 후 이미지 처리 결과를 나타내고 있다. 백색은 공극수, 흑색 부분은 주입된 이산화탄소를 나타낸다. 그 결과, 계면활성제를 활용하지 않은 경우 여과현상(percolation)이 상대적으로 조기에 발생하여 낮은 치환율을 나타낸다(Fig. 8(c)). 하지만, 계면활성제를 활용한 경우 상대적으로 균일한 주입 양상을 나타낸다(Fig. 8(a), 8(b)).

Fig. 9는 동일한 주입속도(0.01mL/min)에서 계면활성제

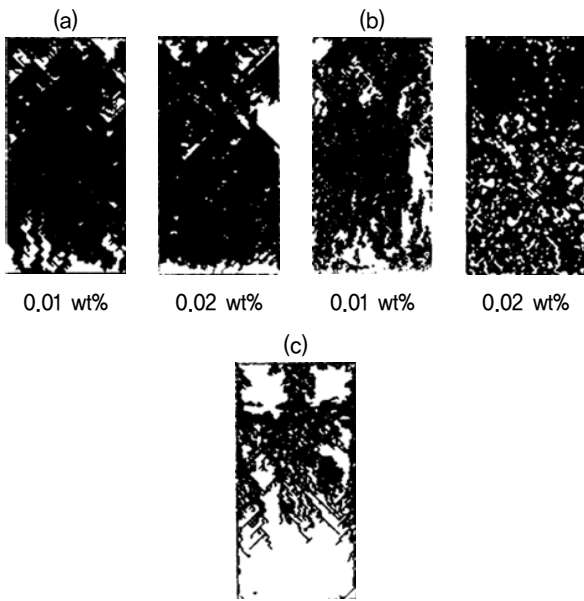


Fig. 8. Image of CO<sub>2</sub> injection (flow rate: 0.01mL/min) on surfactant type and concentration (a) SDS (b) SDBS (c) Water

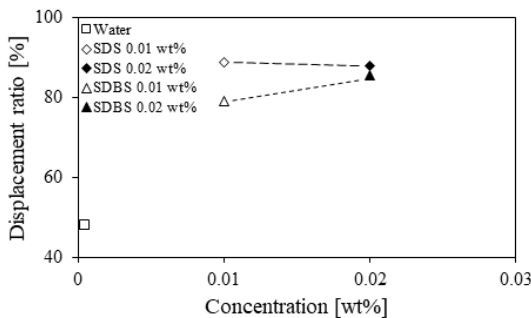


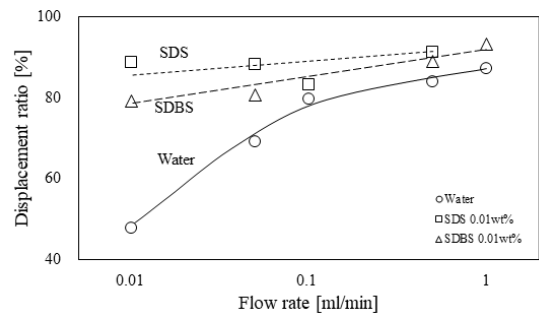
Fig. 9. Displacement ratio on surfactant type and concentration (flow rate : 0.01mL/min)

종류 및 농도에 따른 치환율을 나타내고 있다. 0.01wt%에서 SDS는 순수한 물보다 41% 치환율 증가를 나타냈다. 하지만, 농도가 0.02wt%로 증가해도 치환율은 0.01%와 유사하게 나타나기 때문에, 농도에 따른 효과는 미비하다고 할 수 있다.

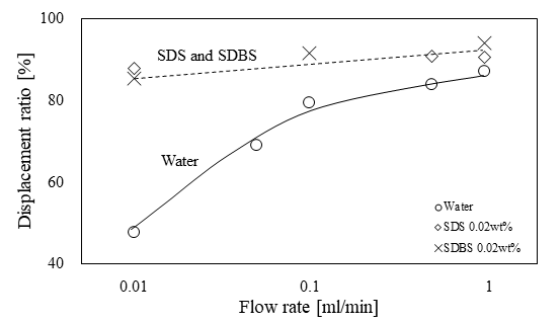
반면, SDBS는 0.01wt% 및 0.02wt% 농도에서 79.12% 및 85.37% 치환율을 각각 나타냄으로써, 농도 증가에 따라 치환율 증가가 SDS보다 크게 나타났다.

### 4.2 주입속도에 따른 치환율 변화

Fig. 10은 주입속도에 따른 치환율을 나타낸다. Fig. 10(a)는 계면활성제 0.01wt%, Fig. 10(b)는 0.02wt% 농도에서 실험 결과를 각각 나타내고 있다. 그 결과, 계면활성제의 사용 여부와 관계없이 주입속도가 증가할수록, 이산화탄소 주입 효율은 증가하고 있다. 계면활성제가 사용되지 않은 경우, 주입속도가 낮을 때는 상대적으로 낮은 주입효율(0.01mL/min에서 47.72%)을 나타내고, 주입속도가 증가함에 따라 주입 효율은 크게 증가하고 있다(1.0mL/min에서 87.04%). 하지만, 계면활성제를 사용한 경우는, 낮은 주입속도에서 이미 큰 주입효율을 보이고 있다(0.01mL/min에서 SDS(0.01% wt) 88.58%, SDBS(0.01% wt) 79.12%). 이에 따라, 주입속도 증가에 따른 주입효율 증가는 순수한 물을 사용한 경우보다 크지 않게 나타난다(0.5mL/min에서 SDS(0.01% wt) 91.05%, SDBS(0.01% wt) 88.85%).



(a) 0.01 wt% concentration



(b) 0.02 wt% concentration

Fig. 10. Displacement ratio on surfactant type

Table 5. The change of displacement ratio on different flow rate

Flow rate [mL/min]	Surfactant Water	SDS		SDBS	
		0.01	0.02	0.01	0.02
1	87.04	-	90.41	93.2	94.1
0.5	83.82	91.05	90.69	88.85	-
0.1	79.48	83.06	-	-	91.53
0.05	68.95	88.1	-	80.49	-
0.01	47.72	88.58	87.91	79.12	85.37

## 5. 결 론

본 연구에서는 마이크로모델 주입실험을 기반으로 계면활성제를 활용한 이산화탄소 주입효율 향상성을 평가하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 계면활성제가 사용되지 않은 물로 포화된 마이크로모델에 이산화탄소 주입 시 주입속도 증가에 따라 치환율은 41% 증가하였다. 특히 0.01~0.5mL/min 구간에서 증가하는 경향을 나타내며 0.5mL/min 이후 수렴하는 경향을 확인하였다.
- (2) SDS 및 SDBS는 0.01wt% 및 0.02wt% 두 가지 농도에 대해 이산화탄소 주입을 수행하였다. 두 가지 계면활성제 모두 낮은 주입속도에서 높은 이산화탄소 주입효율 향상을 가져왔다(0.01mL/min에서 79~88%). 이에 따라 주입속도 증가에 따른 주입효율 상승은 상대적으로 완만하게 나타났다. 또한, 두 가지 계면활성제 모두 낮은 농도(0.01% wt)에서 높은 주입효율을 나타내어, 농도 증가에 따른 효율성 증가도 크지 않게 나타났다.
- (3) SDBS는 SDS와 유사한 분자구조를 형성하고 있다. 이러한 구조적 특성을 바탕으로 0.02wt% 농도 조건에서 주입속도에 따라 SDS와 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 0.01wt% 조건에서는 주입속도 증가에 따라 SDS보다 비교적 급격한 증가 경향을 보였다(0.01~1mL/min 79~93%).
- (4) 위의 결과를 종합하여 볼 때, 음이온성 계면활성제인 SDS 및 SDBS는 농도에 따른 주입효율 차이가 미비하게 나타난다. 따라서, 경제성이 높은 계면활성제의 활용은 이산화탄소 지중 저장 효율 및 경제성 증진에 효과가 있을 것으로 기대된다.
- (5) 본 연구 결과는 2차원 주입실험을 바탕으로 한다. 2차원 주입실험의 한계를 극복하기 위해 추후 3차원 공극 네트워크 모델링 및 현장 시추코어를 활용한 현장 적용성 평가 및 검증은 계획한다. 또한, 실제 주입 현장 지반의 조건을 고려한 최적의 주입속도 및 계면활성제 농도 결정

을 위해 고온·고압 조건에서 이산화탄소 주입실험을 계획한다.

## 감사의 글

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

## References

1. Azam, M. R., Tan, I. M., Ismail, L., Mushtaq, M., Nadeem, M. and Sagir, M. (2013), Static adsorption of anionic surfactant onto crushed Berea sandstone, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 195~201.
2. Benson, S. M. and Surles, T. (2006), Carbon dioxide capture and storage: an overview with emphasis on capture and storage in deep geological formations, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, No. 10, pp. 1795~1805.
3. Cao, S. C., Dai, S. and Jung, J. (2016), Supercritical CO<sub>2</sub> and brine displacement in geological carbon sequestration: micromodel and pore network simulation studies, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 44, pp. 104~114.
4. Dickson, J. L., Smith Jr, P. G., Dhanuka, V. V., Srinivasan, V., Stone, M. T., Rossky, P. J., Behles, J. A., Keiper, J. S., Xu, B., Johnson, C., DeSimone, J. M. and Johnston, K. P. (2005), Interfacial properties of fluorocarbon and hydrocarbon phosphate surfactants at the water-CO<sub>2</sub> interface, *Journal of American Chemical Society*, 44, pp. 1370~1380.
5. Gim, B.-M., Choi, T. S., Lee, J.-S., Park, Y.-G., Kang, S.-G. and Jeon, E.-C. (2013), Evaluation System of Environmental Safety on Marine Geological Sequestration of Captured Carbon Dioxide, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 16, No. 1, pp. 42~52.
6. GCCSI (2015), *What is CCS?*, Melbourne, Australia.
7. Houbraken, I. M. (2018), *The effect of formulation on the volatilisation of plant protection products*, Ghent University, pp. 241.
8. Intergovernmental Panel on Climate Change (2005), *Carbon dioxide capture and storage*, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 442.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (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, Cambridge, UK and New York, NY, USA poverty*, pp. 616.
10. Jafari, M. and Jung, J. (2017), Direct measurement of static and dynamic contact angles using a random micromodel considering geological CO<sub>2</sub> sequestration, *Sustainability*, Vol. 9, No. 12.
11. 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, pp. 152~161.
12. Kim, S. and Santamarina, J. C. (2014), Engineered CO<sub>2</sub> injection: The use of surfactants for enhanced sweep efficiency, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 20, pp. 324~332.
  13. Kwon, L.-G. (2016), Review of CO<sub>2</sub> Storage Projects and Driving Strategy of CO<sub>2</sub> Storage Program in Korea, *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, Vol. 2, No. 2, pp. 167~185.
  14. Massarweh, O. and Abushaikha, A. S. (2020), The use of surfactants in enhanced oil recovery: A review of recent advances, *Energy Reports*, 6, pp. 3150~3178.
  15. Mohammed, I., Al Shehri, D., Mahmoud, M., Kamal, M. S. and Alade, O. S. (2021), A surface charge approach to investigating the influence of oil contacting clay minerals on wettability alteration, *ACS Omega*, Vol. 6, No. 19, pp. 12841~12852.
  16. 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.
  17. 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*, Vol. 54, No. 1, pp. 105~115.
  18. 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.
  19. 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.
  20. Tsouris, C., Aaron, D. S. and Williams, K. A. (2010), Is carbon capture and storage really needed?, *Environmental Science & Technology*, 44, pp. 4042~40445.
  21. United Nations Environment Programme (2021), Emission gas report 2021 : The heat is on - a world of climate promises not yet delivered, Nairobi, pp. 112.
  22. White, C. M., Smith, D. H., Jones, K. L., Goodman, A. L., Jikich, S. A., Lacount, R. B., Dubose, S. B., Ozdenurm E., Morsi, B. I. and Schroeder, K. T. (2005), Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery-A review, *Journal of American Chemical Society*, Vol. 127, No. 3, pp. 659~724.
  23. Xie, X. and Economides, M. J. (2009), The impact of carbon geological sequestration, *Society of Petroleum Engineers, SPE* 120333, pp. 13.
  24. Zhong, L., Mayer, A. and Glass, R. J. (2001), Visualization of surfactant-enhanced nonaqueous phase liquid mobilization and solubilization in a two-dimensional micromodel, *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 523~537.