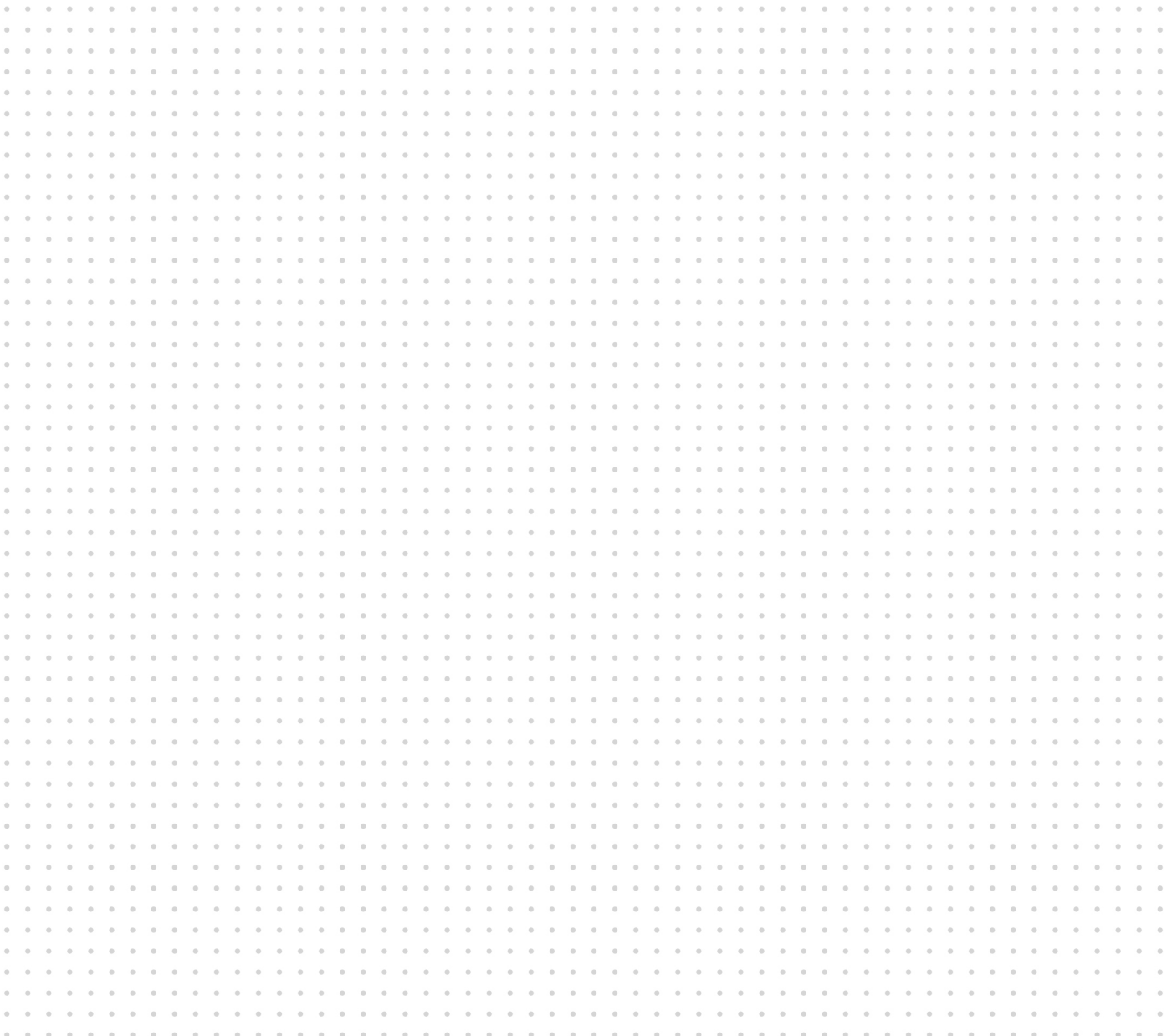


산업계 특별 세션

포스코홀딩스, SK어스온,
KOGAS, SLB, KNOC



국가 CCUS 온실가스 감축경로 분석을 위한 통합 평가 모델 개발

황중수^{1)*}, 안치규¹⁾, 한건우¹⁾

Development of an Integrated Assessment Model for CCUS Greenhouse Gas Abatement Pathways

Jongsoo Hwang^{1)*}, Chi Kyu Ahn¹⁾ and Kunwoo Han¹⁾

초 록

본 연구에서는 국가 차원의 CCUS 부문 온실가스 감축경로 분석을 위한 통합 평가 모델을 개발하였다. 본 모델은 포집, 수송, 저장, 활용 등 CCUS 전반에 걸친 다양한 이벤트 데이터를 통합적으로 반영하여, 온실가스 감축경로에 대한 정량적, 확률적 분석을 수행한다. 특히 기술 성숙도, 프로젝트 이행 일정, 비용 불확실성 등 주요 변수들을 시나리오별로 체계적으로 모델링함으로써 감축 목표 달성 가능성을 다각적으로 평가할 수 있도록 설계하였다.

이를 적용하여, 우리나라 온실가스 감축 국가결정기여(NDC) 달성을 위한 CCUS 감축경로 시나리오들을 평가하였다. 시나리오별 CO₂ 감축경로와 소요 비용을 비교 분석함으로써, 정책 입안자에게 실행 가능하고 경제적으로 합리적인 전략적 결정에 기여하도록 한다. 본 모델은 2030년 NDC 목표 달성에 국한되지 않고, 2035년 NDC 이행 전략에도 직접적으로 기여할 수 있는 분석 프레임워크를 제공한다. 아울러 CCUS 기술 개발 및 상용화 가속화에 필요한 제도적, 재정적 조치에 대한 구체적인 통찰을 제시함으로써, 국가 온실가스 감축 전략 수립 과정에서 중요한 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: CCUS, 감축경로, NDC, 통합평가모델

사 사

본 연구는 기후에너지환경부 온실가스종합정보센터의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : jongsoo.hwang@posco-inc.com

1) 포스코홀딩스 미래기술연구원 저탄소CCUS연구센터

굴진율 실시간 최적화 모델 개발

기세일¹⁾, 이철환¹⁾, 김종국¹⁾, 김남중¹⁾, 박창협^{2)*}

Development of Real-time ROP Optimization Model

Seil Ki¹⁾, Chulhwan Lee¹⁾, Jongkook Kim¹⁾, Namjoong Kim¹⁾ and Changhyup Park^{2)*}

초 록

본 연구에서는, 대상 시추현장의 다양한 조건, 즉 지질학적 변수와 시추운영관련 변수들을 반영하여, 굴진율을 예측하는 머신러닝 모델을 개발하였다. 굴진율 예측의 정확도를 향상하고 현장적용성을 높이기 위해 다음의 세 가지 방안을 고려하였다. 첫째, 암상분포의 수직적 불균질성과 그에 따른 굴진율 경향성의 변화를 반영하기 위해, 암상정보를 클러스터링하여 학습에 반영하였다. 그리고, 수평적 불균질성을 반영하기 위해, 기존 시추공들을 통한 기본모델 생성 후, 인근 시추공 자료 기반 전이학습을 적용하여 대상 시추공의 굴진율을 예측하였다. 그 결과, 신뢰할만한 학습 및 예측 성능을 보여주었다. 이러한 기술을 실용적으로 현장에 활용하기 위해서, 시추진행과정에서의 데이터 취득을 가정하여, 매 100 m 굴진마다 시추운영인자에 대한 민감도분석 및 최적운영인자 도출을 수행하였다. 이러한 최적화 기법을 실제 시추공 시추에 적용한다고 가정하여, 제시하는 방법론으로 대략 19% 정도의 시추시간을 단축할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 굴진율, 암상분포, 클러스터링, 전이학습, 실시간 최적화

서 론

석유가스 개발사업에서 자본지출(Capital Expenditure, CAPEX)의 가장 큰 비중을 차지하는 요소 중 하나는 시추비용이다. 따라서, 굴진율(Rate of Penetration, ROP) 향상은 굴착시간 및 시추비용의 감소로 이어지며, 이는 곧 개발비 감소 및 자산가치 증대로 이어지게 된다. 일반적으로 굴진율에 영향을 미치는 요소로는, 주어진 지질학적 조건과 시추운영인자 두 가지로 분류할 수 있으며, 본 연구에서는 아래의 Table 1의 인자들을 통해 머신러닝 모델을 개발/활용하였다. 본 연구에서는, ROP예측 모델의 신뢰성을 높이고, 이를 바탕으로 시추운영인자 최적화에 대한 방법론을 제시하고 효율성을 평가하고자 한다.

Table 1. Well-logs and drilling operation parameters as the input dataset in the study

Data type		Abbreviation	Unit
Well-logs	Bulk density	RHOZ	g/cm ³
	Sonic travel time	DT	μsec/m
	Gamma ray	GR	gAPI
	Formation resistivity	RT	ohm·m
	Neutron porosity	TNPH	fraction
	Formation photoelectric factor	PEFZ	barns/electron
Drilling-operation Parameters	Weight on bit	WOB	Tonne
	Rotary speed	RPM	r/min

*Corresponding Author : changhyup@kangwon.ac.kr

1) 한국석유공사 E&P/에너지사업본부

2) 강원대학교 에너지자원공학과

본론

기존의 굴진율 예측모델은 경험식에 의존하는 경향이 강하다(Maurer, 1962; Arabjamaloei et al., 2011; Ahmed et al., 2019). 따라서 다양한 지질학적 조건과 시추환경에 대해서 범용적으로 활용되기에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는, 기존의 시추공 자료, 즉 Table 1의 자료가 주어진 환경에서 이들 데이터를 활용하여 신규 시추공에서의 굴진율 예측 모델을 개발하고자 하였다. 모델의 신뢰성을 높이기 위해서 다음과 같은 방법을 활용하였다.

칼만필터를 이용한 데이터 전처리

시추 과정에서 드릴 비트(Drill bit)는 지하 암석을 파쇄하며 전진하며, 이 과정에서 비트에 가해지는 하중(Weight on Bit, WOB) 및 비트의 회전력(RPM), 파쇄된 암편의 운반 및 시추공저 압력 유지를 위한 이수 조건, 그리고 암석의 파쇄압과 암석 내 유체의 공극압 등이 상호작용하여 복잡한 역학적 거동이 발생한다. Fig. 1의 관측한 ROP값들은 검은 실선과 같이 복잡하게 나타나며, 이는 상당히 많은 측정 오차를 포함하고 있다고 가정할 수 있다. 이 자료로부터 경향성을 찾기 위해 칼만필터(Kalman Filter, KF) 기반 전처리를 수행하였고, 붉은 실선의 개선된 ROP자료를 얻었다.

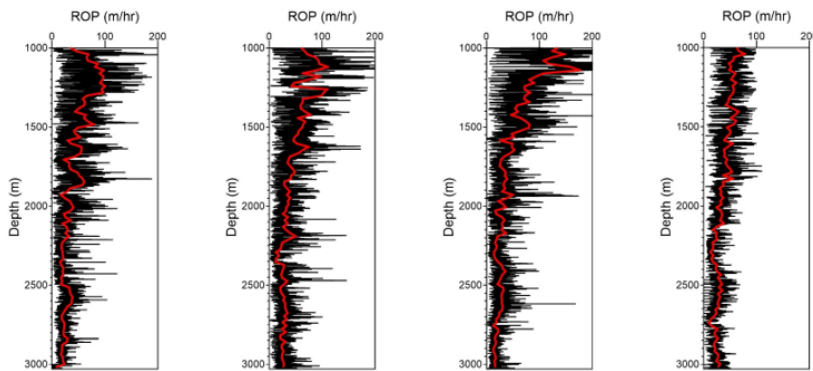


Fig. 1. Comparison between the raw data and the pre-processed ROPs (Lee et al., 2025)

K-means 클러스터링을 통한 암상자료 분류

각 시추공에서의 자료, 즉 Table 1의 입력자료들의 수직분포 특성 경향을 추출하기 위해, 대표적인 클러스터링 기법인 K-means 클러스터링 기법을 사용하여 Fig. 2와 같은 세 개의 cluster를 도출하였다. 물리검층 자료를 활용한 주성분 분석 및 현장 지질암상 대비 결과 군집화가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있고, 일부 취득된 코어의 분석 결과와도 높은 상관성을 확인하였다. 이를 통해, 정성적인 클러스터링 정보를 원핫코딩(one-hot coding)을 활용하여 정량적으로 학습자료에 반영하였다.

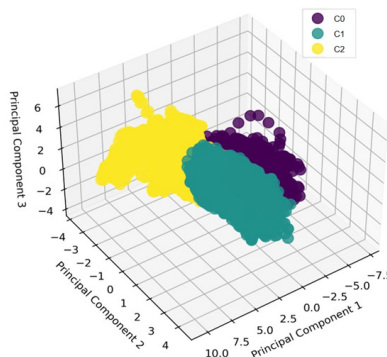


Fig. 2. Results of K-means clustering

전이학습(Transfer learning)을 통한 예측 신뢰성 제고

Fig. 3(a)와 같이 시추공들이 위치하고 있으며, Fig. 3(b)와 같은 전이학습을 적용하여 시추공 E의 ROP 예측 신뢰성을 확인하고, 이를 바탕으로 실시간 최적화의 개념을 시추공 F에 적용하였다.

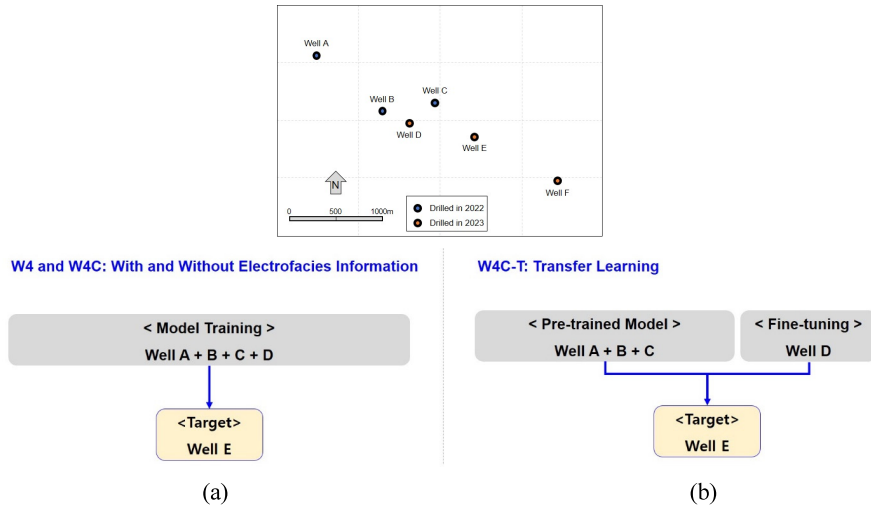


Fig. 3. ROP prediction : (a) well location; (b) transfer learning

실시간 시추운영인자 최적화

시추공 F에서 실시간 굴진을 최적화를 수행하기 위해서는, 신뢰성있는 전위모델을 활용한 민감도 분석 결과를 바탕으로 시추운영인자 적용을 최적화해야한다. Fig. 4와 같은 개념을 활용하여, 시추공 A, B, C, D를 통한 기본모델, E를 통한 전이학습을 적용하여, 시추공 F의 1,000 m to 3,030 m 구간에 실시간 최적화를 적용한 결과, 실제 데이터 대비 19% 정도 소요시간을 단축할 수 있음을 확인하였다.

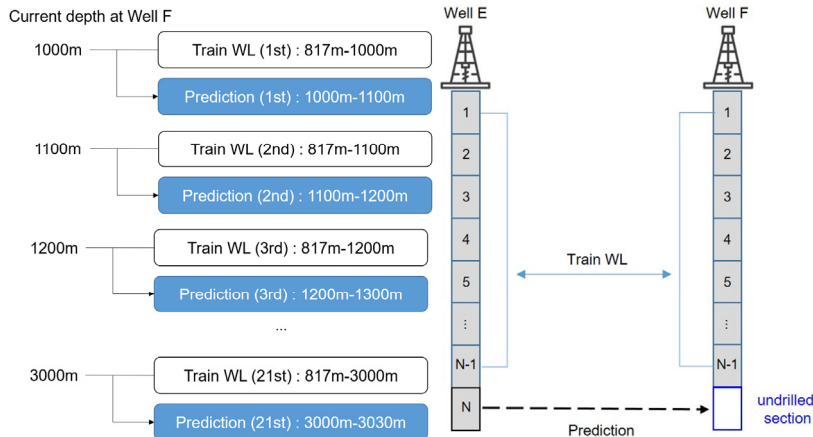


Fig. 4. Concept of real-time ROP optimization

결론

본 연구에서는 신뢰할만한 ROP예측 모델을 바탕으로, 시추운영인자 최적화 및 시추 소요시간 단축을 위한 방법론을 제시하고 관련한 머신러닝 모델들을 개발하였다. 대상 필드에서, 자료 전처리, 암상구분 및 학습 반영, 전이학습, 실시간 최적화 등의 기법들의 타당성을 확인하였고, 이를 통해 시추비용 감소에 기여할 수 있음을 확인하였다.

References

- Ahmed, A., Ali, A., Elkatatny, S., Abdulraheem, A., 2019. New artificial neural networks model for predicting rate of penetration in deep shale formation. *Sustainability*. 11(22), 6527. <https://doi.org/10.3390/su11226527>
- Arabjamaloei, R., Shadizadeh, S., 2011. Modeling and optimizing rate of penetration using intelligent systems in an Iranian southern oil field (Ahwaz Oil Field). *Petrol. Sci. Technol.* 29(16), 1637-1648. <https://doi.org/10.1080/10916460902882818>
- Lee, C., Kim, J., Kim, N., Ki, S., Seo, J., Park, C., 2025. Evaluating the rate of penetration with deep-learning predictive models. *Int. J. Energy Res.* 2025, 8872793. <https://doi.org/10.1155/er/8872793>
- Maurer, W.C., 1962. The "Perfect-Cleaning" theory of rotary drilling. *J. Petrol. Technol.* 14(11), 1270-1274. <https://doi.org/10.2118/408-PA>

탄산염암 저류층에서 탐사정 산출시험 해석을 통한 산처리공법 효과 평가

윤영우¹⁾, 최성준¹⁾, 정승필^{1)*}

Assessment of Acidizing Effectiveness through DST Interpretation in a Carbonate Reservoir Exploration Well

Youngwoo Yun¹⁾, Sungjun Choi¹⁾ and Seungpil Jung^{1)*}

초 록

이 연구에서는 탄산염암 저류층의 탐사정에서 수행된 산처리공법의 효과를 산출시험 해석을 통해 정량적으로 평가하였다. 대상 저류층은 복잡한 공극 구조와 강한 불균질성을 보이는 탄산염암 저류층으로, 생산성이 유정손상과 유동저항에 민감한 특성을 가진다. 이에 따라 코일튜브를 이용한 산처리공법을 수행하고, 작업 전후 산출시험 자료를 비교하여 생산성지수, 유체투과도, 스킨인자의 변화를 분석하였다. 그 결과 산처리 후 생산성지수는 약 23배 향상되었고, 투과도는 증가하였으며, 스킨인자는 양(+)의 값에서 음(-)의 값으로 크게 개선되었다. 이러한 결과는 산처리가 유정 주위 손상을 효과적으로 제거하고 유동 경로를 개선하였음을 보여준다. 이 연구결과는 탐사정 단계에서 산처리의 적용성을 검토하고, 향후 개발 타당성 평가와 생산정 자극 설계의 기초 자료를 제공한다.

주요어: Carbonate reservoir, well test interpretation, pressure transient analysis, acidizing, gas condensate reservoir

서 론

탄산염암 저류층은 복잡한 공극 구조와 균열, 그리고 불균질성이 크게 발달하는 지질학적 특성으로 인해 저류층 내 유체유동이 사암 저류층과는 달리 복잡한 양상을 보인다. 이러한 특성으로 인해 생산성이 국부적인 저류층 손상이나 유동저항에 매우 민감하게 반응하기 때문에 실제 탄산염암 저류층 유전에서는 유정자극(stimulation) 기법인 산처리(acidizing)가 널리 적용되고 있다. 생산정에서는 필요한 시점마다 유정시험을 실행하여 생산성지수, 유체투과도, 스킨인자(skin) 등의 변화를 모니터링하며 저류층 관리에 활용한다(Bukharbayeva et al., 2019). 이 연구에서는 탐사정에서 해당 저류층의 개발 잠재성을 판단하기 위해 산처리작업 전후 산출시험(DST, drill stem test) 결과를 비교 분석하여 산처리가 유동 성능 개선에 미친 영향을 평가하고자 한다.

본 론

대상 저류층의 특성

이 연구의 대상 저류층은 고립 탄산염 암초(Isolated carbonate reef) 저류층으로서, 측면 방향으로 연속적인 탄산염 플랫폼 가장자리의 암초와 달리, 국지적인 고지 또는 구조적 용기부에서 독립적으로 성장한 탄산염암이다. 이러한 저류층의 물성은 암초형 석회암(reefal limestone), 생물기원 입자 풍부 쇄설물(bioclastic grain-rich deposit)과 같은 일차 퇴적상뿐 아니라 후속 속성작용에 의해 결정된다. 특히 해수면 변동에 노출되었을 때에는 용해와 카르스트화 작용(karstification)이 유발되어 공동상 공극(vuggy porosity), 주형상 공극(moldic porosity) 그리고 국지적으로 동굴상 공극(cavernous porosity)이 발달되기 쉽다. 이로 인해 고립 탄산염 암초는 매우 우수한 공극률과 유체투과도를 보일 수 있지만, 동시에 불균질성이 커서 복잡한 생산 거동의 특징을 보인다.

*Corresponding Author : phil.jung@sk.com

1) SK에스온 Tech. Center

탄산염암 저류층에서의 유정지극

불균질한 탄산염암 저류층에서 공극이 발달하지 못한 위치에 시추하였거나 유정주위 손상(near-wellbore damage)에 의해 투과도가 나빠진 경우에 산처리공법이 널리 적용되고 있다. 식 (1)과 같이 탄산염암 저류층을 구성하고 있는 CaCO_3 가 산과 반응하여 용해되는 성질을 이용하여 유정주위 손상을 개선하거나 생산능력을 향상시키는 방법이다. 이 때 파쇄압보다 낮은 압력으로 산을 주입하여 시추 시 저류층 공극 내로 유입되어 막고 있는 불순물을 제거하거나 시추공 주변 저류층에 웜홀(wormhole)을 형성하여 공극의 연결성을 향상시킨다(da Silva et. al, 2024; Keihani Kamal et al., 2024).



이 연구에서 산처리공법은 코일튜브링(coiled tubing)을 이용하여 수행되었다. 먼저 코일튜브링을 목표 심도까지 하강시킨 후, 염수를 이용한 유환 및 압력 관리, 심도보정, 그리고 산세척(acid wash)을 하고 주입성시험(injectivity test)을 수행하여 천공 주변의 손상 제거 및 초기 주입성 변화를 확인하였다. 이후 pre-flush 단계에서는 솔벤트와 초기 HCl 계통 유체를 순차적으로 주입함으로써 유기성 오염물과 근접 손상 구간을 정리하고, 주산(main acid)이 지층과 효과적으로 반응할 수 있는 조건을 조성하였다. 이 때 반응속도를 지연시켜 더 깊게 침투할 수 있는 특수 산 용액인 SXE 20%를 주산으로 주입함으로써 효율적인 탄산염암 저류층 내 웜홀 형성과 시추공 주변 구간의 유동성 개선을 유도하였다. 또한 산 주입 과정에서 코일튜브링을 처리 구간 내에서 상하로 이동시켜 산이 특정 천공부에 편중되지 않고 대상 구간 전반에 보다 균일하게 분배되도록 하였다. 마지막으로 후속 HCl, nitrified HCl, 솔벤트를 이용한 over-flush를 수행하여 산을 지층 내로 추가로 밀어 넣고, 반응 생성물 및 잔류 유체를 정리함으로써 전체 산처리 효율을 극대화하였다.

DST 해석을 통한 산처리작업 효과 분석

시추 후 로깅 결과(Fig. 1)를 분석하여 2700 ~ 2740 mTVDSS 구간에서 사암 및 탄화수소의 부존 가능성을 인지하였다. 이후 MDT(Modular formation dynamics tester)를 통한 압력 구배를 분석하여 가스-물 접촉심도(GWC, gas-water contact)를 2765mTVDSS으로 계산하였다. 이 때 채취한 유체샘플을 통해 가스 컨덴세이트(가스: 1.044 g/cc, 컨덴세이트: 46 °API)의 부존을 확인하였다. 산출시험을 위한 천공구간은 GWC 상부 30m 지점인 2700 ~ 2740 mTVDSS로 설정하였다.

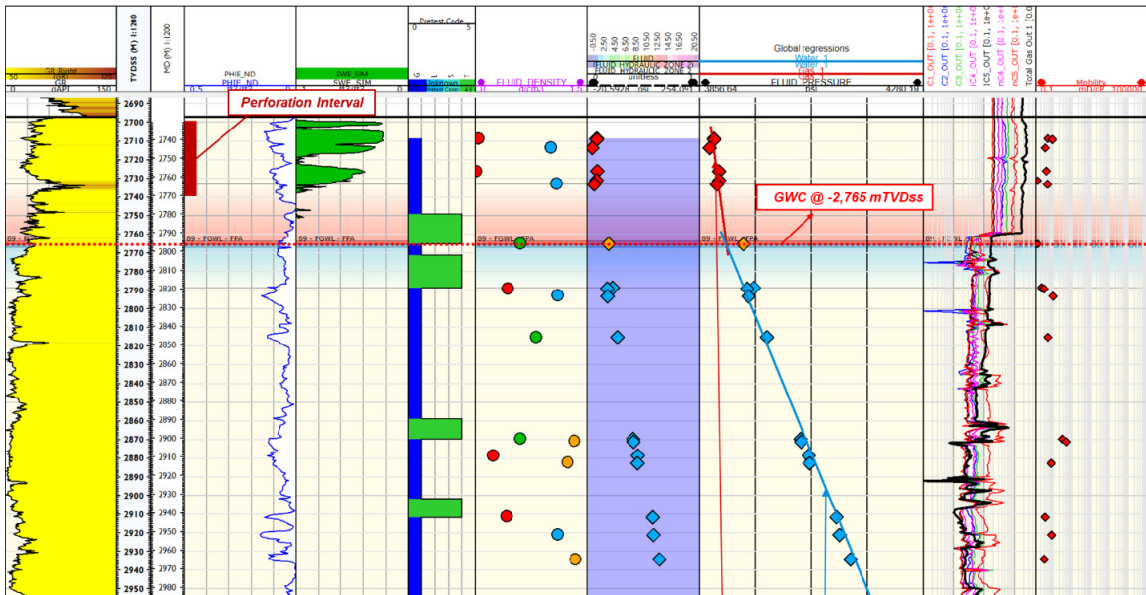


Figure 1. Interpretation of Log and MDT results.

산출시험 운영과정은 시간대별로 공저압력과 유량을 도시화한 Fig. 2에 함께 요약하였다. 천공 이후 초기 클린업(clean-up)을 수행하고 짧은 시간 빌드업(build-up)을 진행하였다. 이후 코일튜브를 이용한 산처리작업을 수행한 뒤, 다양한 유량으로 테스트한 main flow와 빌드업을 진행하였다. 이 연구에서 산처리작업의 효과를 분석하기 위해 작업전 구간은 초기 클린업 유동과 빌드업 구간으로 설정하였고, 작업후 구간은 산처리 작업 수행 이후의 다유량시험(multi-rate test)과 빌드업 구간으로 설정하였다.

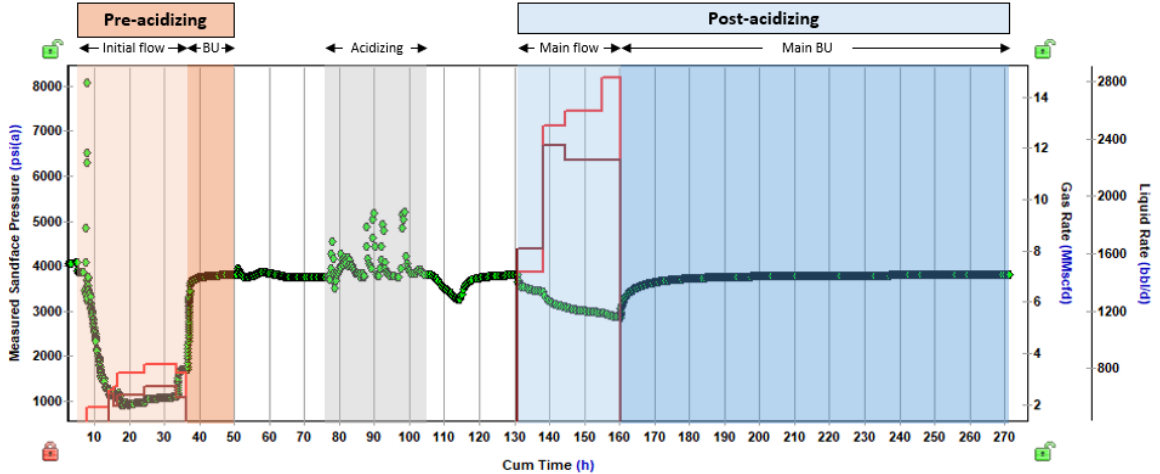


Figure 2. Summary of DST operation history.

일반적으로 가스정의 시험(gas well testing)은 생산성을 평가하는 deliverability test와 시추공 인근의 저류층 물성을 평가하기 위한 PTA(pressure transient analysis) 방식이 있다. 먼저 가스정의 경우 생산성지수는 유사압력(pseudo-pressure)을 사용하여 식(2)과 같이 정의할 수 있다.

$$PI = \frac{Q_g}{m(p_r) - m(p_{wf})} \tag{2}$$

여기서, p_r 은 저류층 평균압력, p_{wf} 는 유동 시 공저압력을 각각 의미한다. 편의상 유사압력 대신 압력의 제곱값을 사용하기도 한다. 가스 저류층의 경우 유량에 따라 변화하는 non-Darcy flow의 영향을 고려하기 위하여 유량의 변화에 따른 공저압력을 측정하여야 한다. 서로 다른 유량으로 back pressure test를 수행할 때 각각의 유량은 안정된 유동 상태에서의 값을 사용하여야 하나 탐사정의 산출시험에서는 유동이 안정화되기까지 충분한 시간을 기다리는 것은 비현실적이다. 이를 보완하는 기법으로 isochronal test, modified isochronal test 등으로 근사치를 계산하는 기법들이 주로 사용되는데 서로 다른 유량 사이마다 시추공을 폐쇄(shut-in)하여야 하는 등 현장운영이 복잡할 뿐만 아니라 치밀한 저류층에서는 여전히 많은 시간이 소요된다. 이 연구에서는 저류층의 유체투과도가 매우 낮아 위의 방법들을 적용할 수 없었으며, 산처리작업 전후의 변화를 대략적으로 비교하는 목적으로 다유량시험으로 유정폐쇄 없이 유량을 변화시켰으며 각각의 유량에서 유동이 안정화되었다는 가정 하에 back pressure test 방식으로 분석하였다. 또한, 생산정에서 유동 시 저류층의 평균압력은 각각의 빌드업 자료에서 분석된 외삽압력(extrapolated pressure)과 같다고 가정하였다. 이 deliverability test 결과를 통해 산처리작업이 이 시추공의 생산성지수를 약 23배 향상시킨 것으로 분석되었다(Table 1).

압력 빌드업 자료를 이용한 PTA 분석에서는 저류층의 물성들을 평가할 수 있다. semi-log plot에서도 외삽압력, 유체투과도, 스킨인자의 값을 구할 수 있지만, 노이즈의 영향과 여러 효과들이 중첩되어 직선으로 나타나는 방사형 유동(radial flow) 구간을 정확하게 구분하기가 어렵다. 반면 log-log plot에서는 압력과 압력미분치를 도시화하면 유동의 특성 변화를 더욱 민감하게 파악할 수 있다. 초기구간에서는 기울기가 1인 구간의 매칭을 통해 wellbore storage capacity(C_D)를 구하였으며, 이후 압력미분치가 0으로 나타나는 방사형 유동 구간을 매칭하여 유체투과도와 스킨인자를 구하였다. 이 연구에서

는 저류층이 치밀하여 방사형 유동을 확실하게 확인할 수 있는 시간까지 충분히 빌드업 할 수 없었으나 안정화 경향에 따라 기울기가 0인 수평선을 매칭하여 분석하였다. 산처리공법을 통해 저류층의 유체투과도는 0.793 md에서 1.297 md로 증가하였으며, 특히 스킨인자는 22.0에서 -1.5로 크게 향상된 것으로 평가되었다. 이 결과는 산처리공법을 통해 유체투과도와 스킨인자가 동시에 개선된다는 기존 연구결과와도 일치하며(Eseimokumoh et al., 2022; Warasta et al., 2021), 산처리작업 전후의 생산자료에서 나타나는 생산성 향상의 정도를 저류층 물성의 차원에서 정량화한 것으로 큰 의미가 있다.

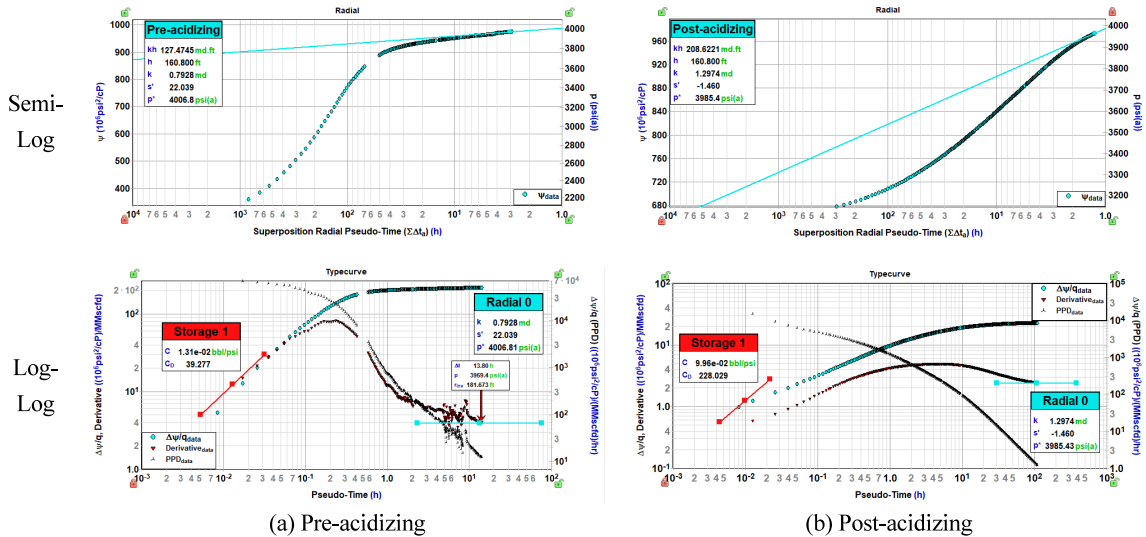


Figure 3. DST interpretation using pressure transient analysis: pressure and pressure derivative curves.

Table 1. Comparison of productivity and reservoir properties before and after acidizing

	Pre-acidizing	Post-acidizing
Productivity index* (scf/day/psi ²)	0.21	4.83
Extrapolated pressure (psi)	4007	3985
Permeability (md)	0.793	1.297
Skin	22.03	-1.46

*Note: The productivity index was compared using the value corresponding to 3 MMscfd of gas rate.

결론

이 연구에서는 탄산염암 저류층을 대상으로 산처리공법 전후의 산출시험 결과를 비교하여 그 효과를 평가하였다. 분석 결과, 산처리 이후 생산성지수는 약 23배 향상되었으며, 유체투과도는 0.793 md에서 1.297 md로 증가하고 스킨인자는 22.0에서 -1.5로 크게 개선된 것으로 해석되었다. 이는 산처리가 유정주위 손상을 효과적으로 제거하고 유동 통로를 개선하여 실제 유동 성능 향상에 기여하였음을 보여준다. 비록 탐사정 산출시험 자료의 한계와 장시간 빌드업 부족으로 인해 해석에 일부 불확실성이 존재하지만, 산처리공법 전후의 일관된 개선 경향은 작업의 유효성을 충분히 뒷받침한다. 따라서 이 연구 결과는 향후 해당 저류층의 개발 타당성 평가와 생산성 자극 설계, 그리고 초기 개발계획 수립을 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

References

- Bukharbayeva, A., Hatiboglu, C., Saurbayev, I., Reedy, J., Haynes, B. and Uap, B., 2019. Value of pressure transient analysis for reservoir surveillance and production optimization during early production of Kashagan field. In SPE Annual Caspian Technical Conference held in Baku, Azerbaijan, 16 – 18 October 2019.
- da Silva, D.C., da Silva, N.P.D., de Meneses Lourenço, M.C., Schwalbert, M.P, de Oliveira Wanderley Neto, A., Rodrigues, M.A.F., 2024. Evaluation of carbonate rock acidizing under different reservoir conditions and damage scenarios: a systematic review. *Carbonates Evaporites*, 39, 113. <https://doi.org/10.1007/s13146-024-01028-2>.
- Eseimokumoh, I.B, Preye, T-A. N. and Ereyananyo, O-W., 2022. Assessing the integrity of a well stimulation operation in Niger Delta using pressure transient analysis. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 5(1), 1188-1197.
- Keihani Kamal, M., Mahdavi Kalatehno, J., Daneshfar, P. and Yousefmarzi, F., 2024. A comprehensive analysis of carbonate matrix acidizing using viscoelastic diverting acid system in a gas field. *Scientific Reports*, 14, 1499. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52104-5>.
- Warasta, A., Sitaresmi, R., Rakhmanto, P.A. and Omar, E.M.A, 2021. Post treatment acidizing study on carbonate rock with wormhole radius method. *Journal of Earth Energy Science, Engineering, and Technology*, 4(1).

E&P사업에서의 한국가스공사 AI기술 적용방향

김동욱^{1)*}, 윤준일¹⁾, 김소영²⁾

Directions for Applying AI Technologies in KOGAS's E&P Business

Donguk Kim^{1)*}, Junil Yoon¹⁾ and Soyoung Kim²⁾

초 록

해외자원개발사업은 불확실성과 제한된 데이터 환경 속에서 저류층 분포 예측, 자원량 산정, 탐사 유망성 평가 등 다양한 의사결정을 요구한다. 이에 공사는 딥러닝 기반으로 시추공 및 탄성파 자료를 활용한 가스층 예측 기술을 적용하였으나, 데이터 품질 및 해상도 한계로 적용 범위에 제약이 있었다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 생성형 AI를 활용하여 제한된 데이터 환경에서도 다양한 지질 시나리오를 도출하고, 저류층 분포 및 탐사 유망구간 예측의 활용 가능성을 검토하였다. 사례 분석을 통해 기존 기법 대비 해석 확장성과 적용 유연성을 확인하였으며, 향후 자원개발 전 단계 의사결정 지원 기술로의 활용 가능성을 제시하고자 한다.

서 론

해외자원개발사업은 지질학적 불확실성과 제한된 데이터 환경 속에서 의사결정을 수행해야 하는 특성을 가지며, 이러한 환경은 투자 리스크 및 사업 운영 효율성 저하로 이어질 수 있다. 특히 국내 여건상 추가 투자 여력이 제한적인 상황에서 탐사 성공률 제고 및 기술 기반 의사결정 체계 구축은 중요한 과제로 대두되고 있다.

이에 따라 최근 인공지능 기반 데이터 분석 기술이 도입되고 있으나, 기존 딥러닝 기반 기법은 학습 데이터 의존성이 높고 적용 범위가 제한되는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위한 방안으로 생성형 AI 기술의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

본 론

자원개발 기술분석 체계의 구조적인 제약

자원개발은 광역 지질조사, 탄성파 탐사, 시추 및 해석을 통해 유망 구조를 도출하고 정적모델을 구축하여 이를 기반으로 개발 전략을 수립하는 과정이다. 그러나 실제 광구 분석은 제한된 정보만으로 해석해야 하며, 이는 본질적으로 불확실성을 수반한다.

정적모델은 시추자료와 탄성파 자료를 통합하여 저류층을 3차원적으로 표현함으로써 매장량 평가 및 개발 의사결정에 활용된다. 하지만 다음과 같은 한계가 존재한다.

- 광구자료의(시추자료 등) 정보 부족으로 인한 불확실성
- 해석자의 경험 및 판단에 따른 모델 편차
- 단일 결과 중심의 결정론적 모델링 구조
- 모델 업데이트 시 반복적 작업으로 인한 비효율성

이와 같은 한계점은 특히 탐사초기단계에서 프로젝트의 비용-수익구조가 불완전한 경우 지속적인 사업에 대한 투자와 운영에 어려움을 더하며, 프로젝트의 운영단계에서도 부담으로 작용하고 있다. 이에 공사는 이러한 불확실성을 감소시킬 방안이 요구되었다.

*Corresponding Author : donguk@kogas.or.kr

1) 한국가스공사 해외사업본부 & 가스연구원

2) 한국가스공사 경기지역본부

딥러닝 기반 E&P 기술분석 적용 및 한계점

공사에서는 이러한 문제를 개선하기 위한 방안으로 대학과 협력과제를 체결하여 지도학습 기반 딥러닝 코드를 학습하고 이를 내재화 하여 공사 참여광구에 적용하였다. 해당 기법은 시추공 로깅자료와 탄성파 자료 간 상관관계를 학습하여 가스층 존재 가능성을 예측하는 방식이다(Byun, et al., 2020).

공사 광구에 적용하기 위해서 현장 데이터와 운영 환경에 적합하도록 알고리즘과 분석 코드를 최적화 하였다. 이 과정에서 데이터 전처리 체계를 정비하고, 해당 광구 특성을 반영 할 수 있도록 입력 변수를 조정하였다. 또한 딥러닝 모델의 학습을 위해서 광구 내 다수의 시추공을 선정하여 데이터 QC를 수행하였으며 이를 통해 AI 모델 학습에 적합한 고품질 데이터를 확보하고, 이 중 일부 시추공을 blind-well로 지정하여 향후 분석 결과의 신뢰성과 현장 적용 가능성을 제고하였다.

적용 결과 일부 구조에서는 기존 해석과 직관으로 식별하기 암상을 예측하는 등 의미 있는 성과를 도출하였다. 특히, blind-well test에서도 유효한 예측 성능을 보이며 기술적 가능성을 확인하였으나, 다음과 같은 한계가 확인되었다.

- 탄성파 해상도가 낮은 지역에서 예측 성능 저하
- 학습 데이터와 상이한 지질 환경에서 적용성 제한

이는 해당 구간에서 암상 분류에 필요한 입력 특징의 해상도와 식별성이 충분하지 않아, 딥러닝 모델의 예측 정확도가 제한되었기 때문으로 판단된다. 따라서 향후 예측 성능 제고를 위해서는 저해상도 구간과 데이터가 부족한 부분을 보완해 나가는 것이 주요 보완 과제가 되었다.

생성형 AI기반 E&P기술 정적모델 구축

생성형 AI는 기존 지도학습 기반의 딥러닝 기법과 달리 데이터 분포 자체를 학습하여 새로운 결과를 생성하는 기술이다. 이는 단일 해답이 아닌 다양한 가능한 결과를 동시에 생성할 수 있다는 특징을 가진다. 이러한 특성은 정적모델 구축환경과 같은 환경에서 다음과 같은 장점을 제공한다.

- 제한된 데이터 환경에서도 다양한 시나리오 생성 가능
- 기존 데이터에서 관측되지 않은 패턴까지 확장된 해석 가능
- 다수의 결과를 통한 불확실성 범위 제시

특히 데이터가 제한된 환경에서 적대적 신경망이나 확산기반 생성모델을 활용할 경우, 기존 데이터의 패턴을 학습하여 새로운 퇴적구조를 생성하거나 결손 데이터를 보완할 수 있는 가능성이 있음을 확인하였다.

생성형 AI의 공사 적용 및 활용 방향

공사는 생성형 AI 기술 확보를 위한 전략의 일환으로 산·학·연 협력체계를 구축하고, 이를 기반으로 관련 기술의 현장 적용 가능성과 활용 잠재력을 종합적으로 검토하고 있다. 생성형 AI는 최근 다양한 산업 분야에서 정보처리와 의사결정 지원의 효율성을 제고할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있으며, 공사 업무와 같은 고도의 전문성과 방대한 데이터 활용이 요구되는 영역에서도 그 적용 가능성이 점차 확대되고 있다(Jo, et al., 2025)

공사는 생성형 AI를 활용하여 퇴적패턴을 학습한 모델을 기반을 정적모델링 및 탐사 의사결정 과정에서의 적용과 활용 가능성을 확대하고 있다. 주요 적용방향은 아래와 같다.

- 기존 정적모델 보완 및 대체 시나리오 생성
- 탐사 유망구간 도출을 위한 확률론적 해석 지원
- 신규 탐사지역에 대한 초기 평가 지원

특히, 공사가 참여중인 광구에 새로운 해석 관점을 제공하는 도구로 활용이 가능함을 확인하였다. 또한, 다양한 참여 광구에 대해서 생성형 AI 적용을 확대해나갈 예정이며, 또한 향후에는 정적모델 뿐만이 아니라 생산예측, 개발 시나리오 평가 등 자원개발 전 단계로 확장 적용이 가능할 것으로 기대된다.

결론

본 연구에서는 해외 자원개발사업에서 발생하는 불확실성과 기존 정적모델링 및 딥러닝 기반 기술의 한계를 분석하고, 이를 보완하기 위한 방안으로 생성형 AI 기술의 적용 가능성을 검토하였다.

생성형 AI는 데이터 분포를 기반으로 다양한 결과를 생성할 수 있는 특성을 통해, 기존 단일 결과 중심의 해석 방식에서 벗어나 보다 유연한 의사결정 지원이 가능함을 확인하였다. 특히 데이터가 제한된 환경에서도 적용 가능하며, 다양한 시나리오 기반 분석을 통해 탐사 및 개발 의사결정의 효율성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

향후에는 다양한 광구 사례를 통한 실증 적용을 확대하고, 기존 물리 기반 해석 및 정적모델링 기법과의 통합을 통해 실효성 있는 기술 적용 체계를 구축할 필요가 있다. 이를 통해 공사는 데이터 기반 자원개발 역량을 강화하고, 해외사업 경쟁력을 제고하여 국가 자원개발물류 향상에 기여할 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 한국가스공사의 해외자원개발사업 수행 과정에서 축적된 자료 및 산·학·연 협력 결과를 기반으로 수행되었습니다.

References

- Byun, et al(2020), *Machine learning based supervised learning for gas reservoir exploration*, Hanyang University
- Jo, et al.,(2025) *Generative AI-driven geological modeling II: Uncertainty Quantification through SinGAN-based Augmentation*. in 2025 Fall Joint Conference of KSMER·KSRM·KSEG·KSPE

저류층 시뮬레이션을 통한 지열 에너지 연구

오현민^{1)*}, 정대인¹⁾

Geothermal Energy Study using Reservoir Simulation

Hyunmin Oh^{1)*} and Daein Jeong¹⁾

초 록

본 연구는 저류층 시뮬레이션을 활용하여 다양한 지열에너지 시스템을 분석할 수 있음을 제시한다. 이를 위해 물과 증기의 물질 및 상변화, 자연균열 및 수압파쇄 모델링, 시추공-저류층 간 열교환, 그리고 열 유입(heat influx)과 같은 주요 물리적 요소들을 고려하였다. 이러한 요소들을 통합적으로 반영함으로써 지열 시스템의 거동을 보다 정확히 예측할 수 있으며, 시뮬레이션이 성능 평가 및 최적화에 효과적인 도구로 활용될 수 있음을 확인하였다.

주요어: Geothermal energy, reservoir simulation, hydrothermal, enhanced geothermal systems, advanced geothermal systems.

서 론

탄소중립과 에너지 전환이 강조되면서, 안정적이고 지속 가능한 에너지원으로서 지열에너지의 중요성이 증가하고 있다. 지열에너지는 기저부하 전원으로 활용 가능하다는 장점이 있으며, 시스템 유형에 따라 자연적인 유체 순환을 이용하는 수열 시스템(hydrothermal, Figure 1-(a)), 인공적으로 균열을 형성하는 향상된 지열 시스템(Enhanced Geothermal System, EGS, Figure 1-(b)), 그리고 폐쇄형 순환 구조를 활용하는 첨단 지열 시스템(Advanced Geothermal System, AGS, Figure 1-(c)) 등으로 구분된다. 그러나 이러한 다양한 시스템의 효율적인 개발을 위해서는 저류층 내 열-유체 거동에 대한 정량적 이해가 필수적이다. 이에 저류층 시뮬레이션은 기존의 유가스전 개발을 위한 용도 이외에도 다양한 지열 시스템의 성능 예측과 설계에 효과적으로 활용될 수 있다.

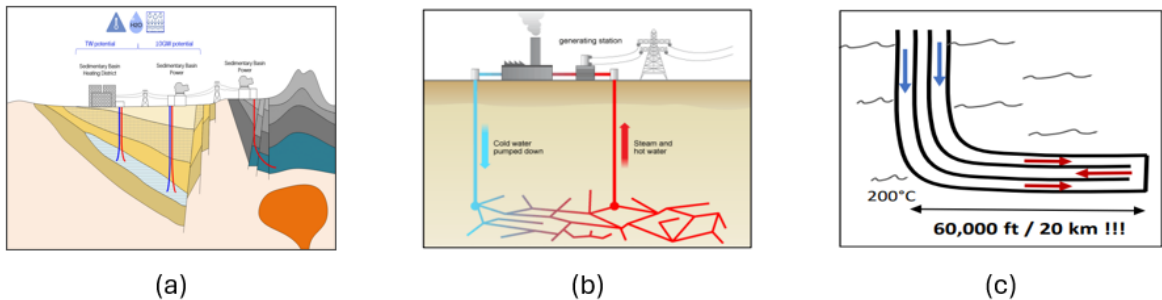


Figure 1. Various types of geothermal energy systems; (a) Hydrothermal; (b) Enhanced Geothermal System; (c) Advanced Geothermal System.

본 론

본 연구에서는 저류층 시뮬레이션을 활용하여 다양한 지열에너지 시스템에 대한 분석이 가능함을 제시하고, 이를 위해 고려되어야 할 주요 물리적 현상들을 정리하였다. 우선, 지열 시스템에서의 유체 거동을 정확히 모사하기 위해서는 공통적으로 물과 증기의 열역학적 및 수송 물성이 필수적으로 고려되어야 한다. 특히 온도 및 압력 변화에 따른 상변화와 물성

*Corresponding Author : HOh@slb.com

1) SLB D&I

변화는 열 전달 및 생산 성능에 직접적인 영향을 미친다. 이와 함께, 저류층 외부로부터 유입되는 열(heat influx)은 장기적인 생산 거동에 영향을 주는 요소로, 특히 심부 지열 시스템에서 중요한 역할을 한다.

또한, 자연균열(natural fracture) 및 수압파쇄(hydraulic fracture)을 통해 물이 운송되고 주변 열을 흡수하는 EGS의 경우 균열 모델링이 중요하다. 균열 네트워크는 유체 유동 경로와 열 회수 효율을 결정하는 핵심 요소로, 이를 적절히 반영하지 않을 경우 실제 시스템 거동과의 차이가 크게 발생할 수 있다. Figure 2은 자연균열을 고려하지 않은 경우 (a)와 자연균열을 이중 공극 및 이중 투과도 (dual porosity and dual permeability) 모델을 통해 고려한 경우 (b)의 주입 유체 농도를 비교한 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯 자연균열은 주입정과 생산정을 연결하는 채널 역할을 하기 때문에 저류층 내의 주입 유체의 거동에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

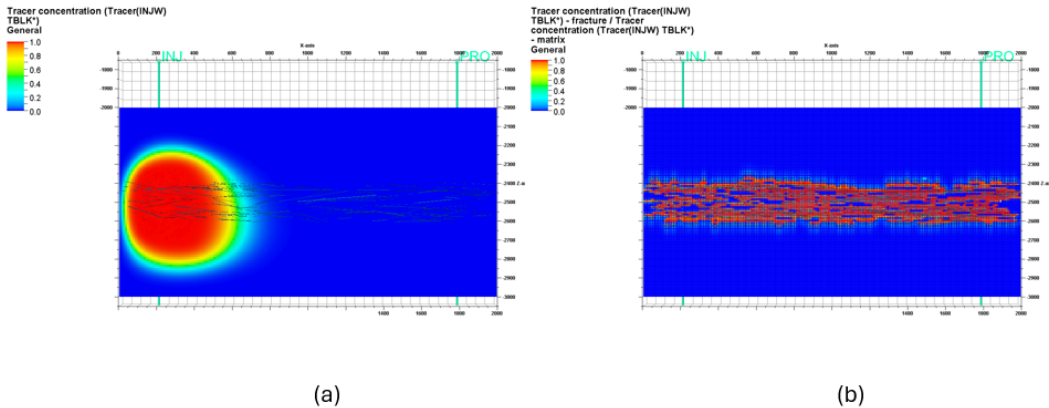


Figure 2. Comparison of injected water concentration between single porosity and dual porosity and permeability model; (a) Single porosity; (b) Dual porosity and permeability.

더불어, 시추공 내부의 닫힌 시스템을 통해 물을 순환시키는 AGS의 경우 시추공 내부와 저류층 간의 열교환은 중요한 고려 요소이다. 시추공 내 유체의 이동 과정에서 발생하는 열손실 및 열교환은 전체 시스템 효율에 영향을 미치며, 이를 반영하기 위해 wellbore heat transfer 모델이 필요하다. Figure 3은 각각 closed loop system을 가진 well trajectory 따라 wellbore heat transfer 모델을 고려하지 않은 경우(a)와 고려한 경우(b)의 저류층 온도 분포를 비교한 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯 저류층 모델을 고려함에 따라 저류층 내부의 온도 분포가 wellbore를 주변으로 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 온도 변화는 시스템 전체의 효율 예측에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 wellbore heat transfer 모델이 시스템 효율 예측에 중요한 역할을 수행함을 알 수 있다.

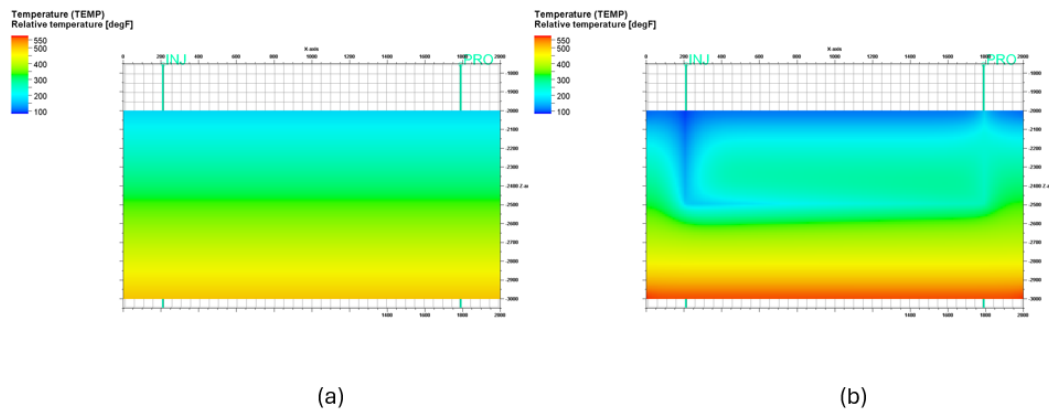


Figure 3. Comparison of reservoir temperature between the cases without (a) and with (b) considering wellbore heat transfer model.

이와 같은 다양한 물리적 현상을 통합적으로 고려함으로써, 저류층 시뮬레이션은 단순한 유체 유동 해석을 넘어 열 회수 효율, 생산 수명, 시스템 최적화 등 다양한 측면에서 유용한 분석 도구로 활용될 수 있다.

결론

본 연구는 저류층 시뮬레이션을 통해 다양한 지열에너지 시스템을 효과적으로 분석할 수 있음을 제시하고, 이를 위해 필수적으로 고려되어야 할 주요 물리적 현상들을 정리하였다. 물과 증기의 물성 변화, 균열 모델링, 시추공-저류층 간 열교환, 그리고 외부 열 유입 등은 지열 시스템의 거동을 정확히 예측하기 위한 핵심 요소이다. 이러한 요소들을 종합적으로 반영한 시뮬레이션은 지열에너지 개발의 불확실성을 줄이고, 경제성과 효율성을 극대화하는 데 기여할 수 있다. 향후에는 보다 정교한 물리 모델과 실제 현장 데이터의 통합을 통해 지열 시스템 해석의 신뢰성을 더욱 향상시킬 필요가 있다.

육상 생산광구 다상 펌프의 운전 안정성 개선 사례 연구

강수명¹⁾, 임종필^{1)*}

Operational Reliability Improvement of Multi-phase Pump in a Onshore Oil Field

Soomyeong Kang¹⁾ and Jongpill Lim^{1)*}

초 록

육상 생산광구에서 운전 중인 다상펌프(Multi-Phase Pump)는 생산유체 이송의 핵심 기기로서 그중 기계식 Seal은 이송하는 유체가 펌프 외부로 누설되는 것을 방지하는 역할을 수행하며 설비 신뢰성 확보와 안전 운영에 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서는 해당 설비에 적용된 기존 Seal plan의 운전 현황을 분석하여, 기존 Seal Plan에 포함된 다수의 보조 배관 및 계측 장치를 포함한 복잡한 시스템 구성이 실제 운전시 관리 복잡성을 증가시키고, 설비 운영 효율을 저하시킬 수 있음을 확인하였다.

이에 기존 Seal plan을 API seal plan 개념을 기반으로 핵심 기능 중심의 단순한 구조로 재구성하는 개선 방안을 제시하였으며, 개선된 시스템을 실제 설비에 적용한 결과 Seal system 관련 이상 발생 빈도가 감소하는 효과가 확인되었다. 본 연구는 다상 펌프 Seal 시스템 설계에서 기능적 안정성과 함께 시스템 단순성과 운전 관리성을 고려한 접근의 중요성을 제시한다.

주요어: 다상펌프, 기계식 Seal, Seal Plan, 복잡성, 단순화

서 론

육상 생산광구에서는 생산 유체의 판매 및 이송을 위해 다양한 형태의 회전기기가 활용되고 있다. 그중 다상펌프(multi-phase pump)는 생산된 유체를 별도의 상분리(Separation) 공정 없이 직접 이송할 수 있다는 장점으로 인해 널리 적용되고 있다. 또한, 생산 시스템의 단순화와 설비 운영 효율성 향상을 고려하여 일부 광구에서는 다상펌프를 병렬로 운영하고 있다. 이러한 다상펌프의 안정적인 운전은 생산 설비 전체의 가동률은 물론 광구 생산량에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소라 할 수 있다.

특히 회전기기의 주요 구성 요소인 기계식 Seal(mechanical seal)의 신뢰성은 설비의 운전 안정성을 확보하는데 있어 매우 중요하다. 기계식 Seal은 이송되는 유체가 펌프 외부로 누설되는 것을 차단하는 역할을 수행하며, Seal 챔버 내부에서 적절한 냉각 및 윤활 조건이 유지되어야 안정적인 운전이 가능하다. 이를 위해 산업 현장에서는 일반적으로 API Standard 682에서 제시된 다양한 Seal plan이 적용되고 있으며, 대표적으로 Plan 11, Plan 52, Plan 53 등이 사용된다.

그러나 다양한 운전 조건을 고려하여 설계 단계에서 시스템을 복잡하게 구성할 경우, 실제 운전 환경에서는 오히려 운전 및 유지보수 측면에서 새로운 문제를 야기할 수 있다. 특히 다수의 보조 배관 및 계측 장치가 포함된 Seal plan은 시스템 구조를 복잡하게 만들고, 운전 상태의 정확한 파악과 분석을 어렵게 만드는 요인으로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 육상 생산 광구에서 실제 운전 중인 다상 펌프의 Seal plan 운전 사례를 분석하고, 기존의 복잡한 Seal plan을 API Seal plan 기반의 단순한 구조로 재구성 및 적용함으로써 설비 운전 안정성과 유지관리 효율을 향상시킨 사례를 제시하고자 한다.

*Corresponding Author : soomyeong.kang@knoc.co.kr

1) 한국석유공사 E&P/에너지사업본부

본 론

기존 Seal Plan 운전 현황

본 연구의 대상 설비는 육상 원유 생산 광구에 설치된 다상펌프로써 생산 유체를 처리 설비로 이송하기 위한 목적으로 운영되고 있다. 해당 설비는 초기 설계 단계에서 기계식 Seal의 안정적인 운전을 확보하기 위해 비교적 정교한 Seal plan이 적용되었으며, Seal 챔버 내부 유체 순환과 냉각을 위한 다수의 보조 배관과 운전 상태 모니터링을 위한 계측 장치가 포함되어 있다.

기존 Seal plan은 펌프 내부 유체를 활용한 순환 구조와 외부 보조 라인을 결합한 형태로 구성되어 있으며, Seal 챔버 내 유체 순환을 통해 Seal 표면에서 발생하는 열을 제거하고 안정적인 운전 조건을 유지하도록 설계되었다. 그러나 실제 현장 운전 과정에서는 이러한 시스템 구성의 복잡성으로 인해 운전 관리 측면에서 여러 가지 한계가 확인 되었다.

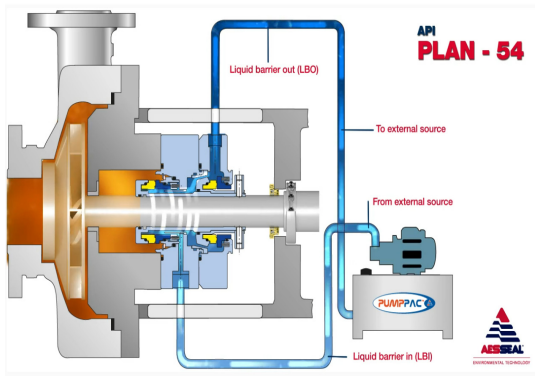
특히 다수의 배관 라인과 계측 장치가 포함된 구조는 운전 상태를 직관적으로 파악하기 어려웠으며, 이상 발생 시 원인 분석에 상당한 시간이 소요되는 문제가 확인되었다. 또한 복잡한 배관 구성은 유지보수 작업 시 접근성을 저하시켜 정비 효율을 저해하는 주요 요인으로 작용하였다.

현장 운전 기록과 유지보수 이력을 분석한 결과 Seal system 관련 점검 및 정비 작업이 반복적으로 수행되고 있었으며, 이로 인한 생산량 손실의 영향도 적지 않았다. 이러한 결과는 설계 단계에서 고려된 기능적 안정성과 실제 운전 환경에서 요구되는 운전 관리성 간에 차이가 존재함을 시사한다.

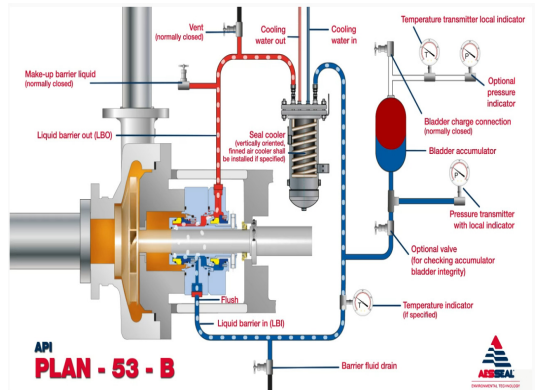
Seal Plan 단순화 개선 방안

본 연구에서는 기존 Seal plan의 구성 요소와 기능을 재검토하여 실제 운전 환경에서 필수적인 기능을 중심으로 시스템을 단순화하는 개선 방안을 도출하였다. 개선 과정에서는 기존 Seal plan에 포함된 각 배관 라인과 계측 장치의 역할을 분석하고, Seal 챔버 내 유체 순환과 냉각 기능을 유지하는 데 필요한 핵심 요소를 중심으로 시스템을 재구성하였다.

특히 기존 시스템에서 운전 관리 복잡성을 증가시키는 조건들을 단순화하였으며 API Seal plan에서 제시된 기본 개념을 참고하여 보다 직관적인 형태로 재구성하였다. 이를 통해 Seal 챔버 내 안정적인 유체 순환을 유지하면서도 시스템 구성 요소를 최소화하는 방향으로 Seal plan을 개선하였다.



[기존의 Plan 54]



[변경된 Plan 53B]

또한 기존의 복잡하고 정교한 운전 제어시스템을 단순화시켜 오작동을 최소화할 수 있는 시스템을 구성하였다. 이러한 접근은 설비의 기본적인 Seal 냉각 및 순환 기능을 유지하면서도 운전 관리성과 유지보수 효율을 향상시키는 것을 목표로 하였다.

적용 결과 및 운전 성능 평가

개선된 Seal plan은 실제 생산 설비에 적용된 이후 일정 기간 동안의 운전 데이터를 기반으로 성능을 평가하였다. 적용 결과, 시스템 구조의 단순화로 인해 설비 상태에 대한 파악이 용이해졌으며, 운전 관리 측면에서 전반적인 효율이 향상되

는 것으로 확인되었다.

또한 유지보수 작업 수행 시 구성 단순화로 인해 작업 접근성이 개선되었으며, 설비 점검 및 정비에 소요되는 시간이 감소하는 경향이 나타났다. 또한 Seal system 관련 이상 발생 빈도 역시 감소하는 결과가 확인되었으며 이는 Seal plan 단순화가 실제 설비 운전 안정성 향상에 긍정적인 영향을 미쳤음을 의미한다.

결론

본 연구에서는 육상 생산광구에서 운전 중인 다상펌프의 Seal plan 운전 사례를 분석하고, 기존의 복잡한 Seal system을 보다 단순한 구조로 개선한 사례를 제시하였다. 분석 결과, 설계 단계에서 기능적 안정성을 확보하기 위해 적용된 복잡한 Seal plan이 실제 현장 운전 환경에서는 운전 관리 및 유지보수 측면에서 한계를 가지는 것으로 확인하였다.

이에 따라 Seal plan 구성 요소를 재검토하고 시스템을 단순화하는 개선 방안을 적용하였으며, 실제 설비 적용 결과 운전 관리성과 유지관리 효율이 향상되는 효과가 확인되었다. 본 연구는 회전기기(다상펌프) Seal 시스템 설계 시 기능적 안정성과 함께 시스템 단순성과 운전 관리성을 고려한 설계 접근의 중요성을 제시한다.

향후 본 연구결과는 유사한 운전 환경을 갖는 육상 원유 생산 설비에서 회전기기 Seal 시스템 설계 및 운전 전략 수립 시 유용한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

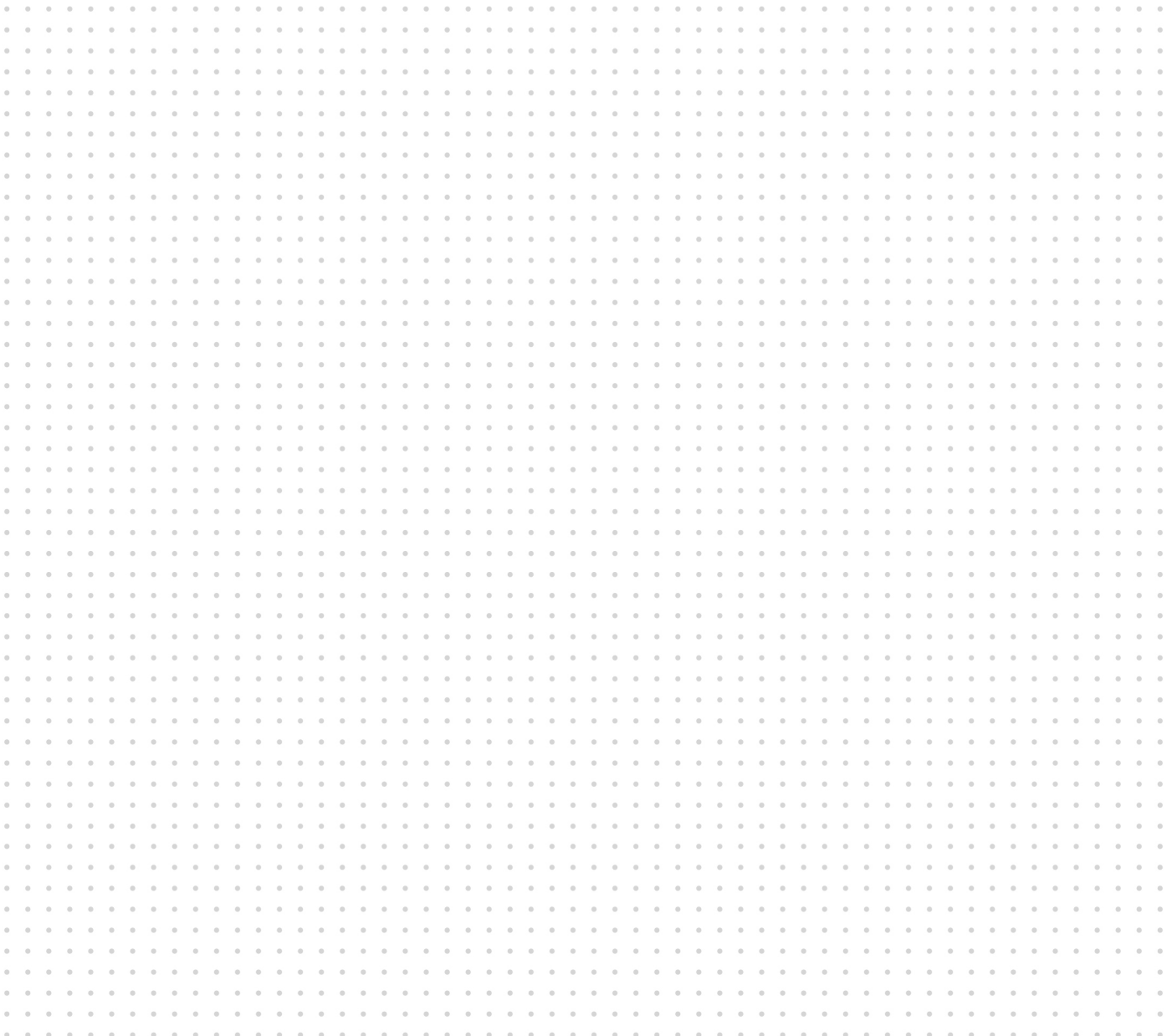
References

Seal Plan 54 <https://www.aesseal.com/en/resources/api-plans/api-plan-54/>

Seal Plan 53B <https://www.aesseal.com/en/resources/api-plans/api-plan-53b/>

일반 세션

석유·가스 탐사, 개발, 생산(E&P)
탄소 포집, 활용, 저장(CCUS)



오일샌드 광구의 SOR 저감을 위한 ES-SAGD 및 NCG 공법 비교 연구

김민^{1)*}, 박재경¹⁾, 이종용¹⁾

A Comparative Study of ES-SAGD and NCG Injection Processes for SOR Reduction in Oil Sand Reservoirs

Min Kim^{1)*}, Jaekyung Park¹⁾ and Jongyong Lee¹⁾

초 록

본 연구에서는 오일샌드 광구에서 Steam-to-Oil Ratio(SOR) 저감을 위한 대표적 공법인 Expanding Solvent-SAGD (ES-SAGD)와 Non-Condensable Gas(NCG) 주입 공법의 적용성을 저류층 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 기 구축된 지질모델 및 multi-well pair SAGD 시뮬레이션 모델을 활용하여 두 공법의 오일 증산 및 스팀 절감 효과를 정량적으로 평가하였다.

시뮬레이션 결과, ES-SAGD 공법은 스팀과 solvent를 동시 주입함으로써 비튜멘 점성도를 효과적으로 감소시켜 기존 SAGD 대비 약 23%의 오일 생산량 증가와 약 23%의 CSOR 감소를 나타냈다. 반면, NCG 주입 공법은 오일 생산량이 약 29% 감소하였으나, 상부 가스층 형성에 따른 열손실 억제 효과로 스팀 사용량이 약 55% 절감되었으며, 결과적으로 CSOR 은 약 35% 개선되었다.

이러한 결과는 ES-SAGD 공법이 오일 생산 극대화에 효과적인 반면, NCG 주입 공법은 스팀 제약 조건에서 운영 효율을 극대화하는 데 유리함을 시사한다. 본 연구는 현장 운영 조건에 따른 최적 SOR 저감 전략 수립을 위한 기술적 근거를 제공한다.

주요어: 오일샌드, SAGD, SOR(Steam-to-Oil Ratio), ES-SAGD(Expanding Solvent-SAGD), NCG(Non-Condensable Gas) 주입

서 론

Steam Assisted Gravity Drainage(SAGD)는 회수증진법(Enhanced Oil Recovery, EOR) 중 하나로 원유의 점성도가 높아 자연유동이 이루어지지 않는 중질유를 회수하기 위한 열공법이다. 특히 점성도가 매우 높은 오일샌드(Oil Sand)의 비튜멘(Bitumen)을 개발·회수하기 위해 캐나다 아사바스카(Athabasca) 지역에서 널리 사용되고 있다. 그러나 SAGD 공법은 높은 스팀 사용량으로 인해 운영 비용 증가 및 온실가스 배출 증가라는 한계를 가지고 있으며, 이에 따라 SOR 저감 기술의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다.

안치영 등(2023)은 구축된 지질 모델의 적정성 검증을 위해 히스토리 매칭 연구를 수행하였고 해당 모델을 기반으로 생산량 및 스팀 주입량을 예측하였다. 김민 등(2024)은 Multi-well pair SAGD 저류층 시뮬레이션을 활용하여 신규 Pad 지역 SAGD well pair의 위치 선정 및 well spacing을 최적화 하였다. 또한 김민 등(2025)은 스팀주입량 절감을 목적으로 SAGD well pair에서 스팀 주입의 NCG 전환 시뮬레이션 초기 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기 구축된 지질모델 및 multi-well pair SAGD 저류층 시뮬레이션을 활용하여 ES-SAGD와 NCG 주입 공법의 적용성을 정량적으로 비교 분석하고, 스팀 제약 및 생산 목표에 따른 최적 공법 선택 기준을 제시하고자 한다.

본 론

ES-SAGD 공법은 스팀과 소량의 Solvent를 동시에 주입하는 공법으로 스팀 챔버 경계에서 응축된 Solvent는 비튜멘을 희석시켜 스팀의 열과 함께 비튜멘 점성도를 감소시킴으로서 오일 생산량을 증가시킨다. 하지만, Solvent의 높은 비용과

*Corresponding Author : m.kim@knoc.co.kr

1) 한국석유공사 E&P/에너지사업본부

낮은 Solvent 회수율은 ES-SAGD 공법 경제성 평가에서 주요 불활실성 요인으로 작용한다. NCG 주입 공법은 메테인(CH₄), 질소(N₂), 이산화탄소(CO₂)와 같은 비응축성 가스를 스팀과 함께 동시에 주입하는 공법으로 스팀 챔버 상부의 가스층 형성으로 인한 스팀 절감 효과는 크지만, 상대적으로 오일 증산 효과는 제한적일 수 있다.

ES-SAGD와 NCG 주입 공법은 캐나다 내 다수의 현장에 적용 중이며, Table 1은 주요 사례를 정리한 표이다. Connacher사의 Great Divide-Algar 프로젝트는 대표적인 ES-SAGD 적용 사례이다(Connacher, 2013, 2025). Pilot Phase 1에서 Diluent(10~15 vol%) 주입 결과, 오일 생산량 28% 증가, SOR 16% 감소, Solvent 회수율 89%를 달성했다(Connacher, 2013). Phase 1.5에서는 Solvent 주입 비율을 4 vol%까지 감축했음에도 오일 생산량이 30% 증가하고, SOR은 4.5에서 2.9로 32% 개선되었다(Connacher, 2013). 이를 바탕으로 2022년부터 6개 well-pair에 상업적 확대를 시행 중이다(Connacher, 2025). MEG Energy의 Christina Lake 프로젝트(eMSAGP)는 Phase 2B에서 4년의 SAGD 선행 후 NCG(메테인, ~20 mol%) 주입으로 전환했다(MEG Energy, 2024). 그 결과 SOR은 2.0에서 1.2로 40%, CSOR은 2.5에서 2.1로 개선되었다. Connacher사 역시 2022년부터 40개 well-pair에 NCG 주입을 전면 확대하여, SOR을 4.5에서 3.2로 29% 저감하며 기술적 효용성을 입증했다(Connacher, 2025).

Table 1. Summary of Representative Pad/Field Applications for ES-SAGD and NCG injection Projects.

Technology	Project (Operator)	Implementation Period / Scale	Solvent/NCG & Concentration	Key Results	Reference
ES-SAGD	Great Divide - Algar (Connacher)	[Pilot] '11 ~ '13 / 3 well-pairs	Diluent (4~15 vol%)	Oil ↑ 28~30% SOR ↓ 16-32%	(Connacher, 2013)
		[Pad] '22 ~ Present / 6 well-pairs	Light hydrocarbon solvent (5~10 vol%)	SOR low 2.52 ('23) 2-yr CSOR ↓ 20~35%	(Connacher, 2025)
NCG Injection	Christina Lake (MEG Energy) Great Divide - Algar & Pod One (Connacher)	[Multi-pad] '22 ~ Present Multi-pad (Ongoing)	NCG (CH ₄) (~20 mol%)	SOR ↓ 40% (2.0→1.2)	(MEG Energy, 2024)
		[Field] 2021 - Present Field-wide rollout across 40 well-pairs	NCG (CH ₄) (3~5→100mol%)	SOR ↓ 29% (4.5→3.2) Steam redeployment to new pads	(Connacher, 2025)

본 연구에서는 4개의 well-pair로 구성된 Multi well-pair 저류층 시뮬레이션 모델을 구축하여 분석을 수행하였다(Fig. 1). ES-SAGD와 NCG 주입 전환 시점은 2027년 1월로 설정하였고, Solvent는 헥세인(C₆) 2 Mol%, NCG는 메테인(CH₄) 2 Mol%로 각각 설정하였다. 저류층 초기 조건, 수직-수평유체투과도비(Kv/Kh)와 상대투과도(relative permeability), 운영조건 등은 히스토리 매칭 선행 연구 결과를 참고하였다(안치영 등, 2023; 김민 등, 2024, 2025).

ES-SAGD 시뮬레이션 결과, 2027년부터 2032년까지 오일 생산량은 기존 SAGD 대비 약 23% 증가하였으며, CSOR은 약 23% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, Solvent 회수율은 약 70% 수준으로 나타나 인근 필드의 상업화 수준과 유사한 경향을 보였다. 이는 solvent 주입에 따른 점성도 감소 효과가 생산성 향상에 크게 기여함을 의미한다.

반면, NCG 주입 시뮬레이션 결과에서는 기존 SAGD 대비 약 29% 오일 생산량이 감소하였지만, 스팀 주입량은 기존 대비 약 55% 절감되었고, 그 결과 CSOR은 약 35% 개선되었다. 이는 상부 가스층 형성에 따른 열손실 억제 및 스팀 활용 효율 증가에 기인한 것으로 판단된다.

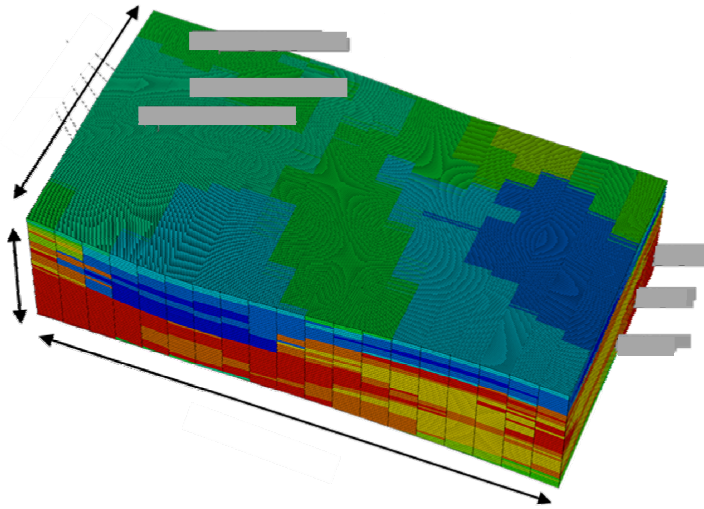


Fig. 1. Multi well-pair simulation model.

결론

본 연구에서는 오일샌드 광구의 SOR 최적화 방안을 마련하기 위해 저류층 시뮬레이션을 활용하여 ES-SAGD 공법과 NCG 주입 공법의 SOR 저감 효과를 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, ES-SAGD 공법은 오일 생산량을 약 23% 증가시키고 CSOR을 약 23% 감소시키는 효과를 나타내어, 생산량 증대를 통한 SOR 개선에 효과적인 것으로 평가된다.

둘째, NCG 주입 공법은 오일 생산량 감소에도 불구하고 스팀 사용량을 약 55% 절감하여 CSOR을 약 35% 개선하는 결과를 보였으며, 스팀 제약 조건에서 운영 효율을 극대화하는 데 유리한 것으로 판단된다.

결론적으로 두 공법은 서로 다른 물리적 메커니즘을 기반으로 하므로, 광구의 스팀 공급 조건, 생산 목표, 경제성 요소 등을 종합적으로 고려하여 선택적으로 적용하는 것이 필요하며, 향후 연구에서는 solvent 주입 비율 및 NCG 농도 변화에 따른 민감도 분석과 함께, solvent 회수율 및 스팀 비용을 포함한 경제성 평가를 통합하여 최적 운영 전략을 도출할 예정이다.

References

- 안치영, 박재경, 장태현. (2023). McMurray SAGD 저류층 시뮬레이션 영향 인자 연구. 2023추계자원연합학술대회, 평창.
- 김민, 박재경, 장태현. (2024). Multi-well pair SAGD 저류층 시뮬레이션을 통한 well spacing 최적화 연구. 2024년 한국자원공학회 제122회 춘계학술대회, 여수.
- 김민, 박재경, 이종용. (2025). SAGD well pair에서 스팀 주입의 NCG 전환 시나리오 비교 분석 연구. 2025년 한국자원공학회 제124회 춘계학술대회, 제주.
- Connacher. (2013). Connacher AER Performance Review November 2013.
- Connacher. (2024). Connacher Performance Report for the 2024 Calendar Year. <https://static.aer.ca/prd/documents/oilsands/insitu-presentations/2024-connacher-greatdivide-10587.pdf>
- Connacher. (2025). Connacher Performance Report for the 2024 Calendar Year. <https://static.aer.ca/prd/documents/oilsands/insitu-presentations/2025-connacher-greatdivide-10587.pdf>
- MEG Energy. (2024). Christina Lake Regional Project 2023 Directive 54 Performance Report. <https://static.aer.ca/prd/2024-10/2024-meg-christinalake-10773.pdf>

공간 조건화 및 패치 기반 확산 모델을 활용한 현장 규모 채널 저류층 특성화

박은실¹⁾, 윤준일²⁾, 김동욱²⁾, 조홍근^{1)*}

Field Scale Channelized Reservoir Generation Using Spatially Conditioned Patch-based Diffusion Modeling

Eunsil Park¹⁾, Junil Yoon²⁾, Donguk Kim²⁾ and Honggeun Jo^{1)*}

초 록

공간적 이질성을 반영한 지질 모델 생성은 저류층 특성화와 유동 예측에 필수적이지만, 기존의 딥러닝 기반 생성 기법은 대규모 학습 데이터셋에 의존하기 때문에 자료가 제한된 실제 저류층 문제에 적용하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 객체 기반 하성퇴적환경을 모사한 FLUVSIM으로 생성한 단일 저류층 모델을 바탕으로 3차원 패치 기반 diffusion 모델링을 제안한다. 본 방법은 증첩된 3차원 패치와 공간적 위치 임베딩을 활용해 지질 구조를 학습하고, implicit diffusion sampling을 통해 추론 속도를 높인다. 제안한 모델은 $192 \times 192 \times 64$ 크기의 저류층 모델을 생성하며, 채널 연속성, 암상 연결성, 공간적 이질성을 효과적으로 재현한다. 또한 완전한 3차원 지질 모델을 약 7분 내에 생성할 수 있음을 보여주어, 데이터가 제한된 환경에서도 현장 규모 저류층 모델링에 적용 가능성을 시사한다.

주요어: Diffusion model, patch-based generation, 3D geological modeling, channelized reservoir, spatial heterogeneity

서 론

석유·가스 저류층에서 지질 모델링은 층서 구조, 이질성, 연결성과 같은 지질학적 특성이 저류층 거동을 좌우한다는 점에서 중요하다(Eaton, 2006; Pyrcz & Deutsch, 2014). 특히 복잡한 퇴적계에서는 암상 분포와 연결성이 유체 유동 경로를 지배하므로, 생산 예측과 저류층 해석은 가정된 지질 구조에 매우 민감하다(Morris et al., 2025). 또한 실제 지하 구조는 제한된 관측 자료만으로 충분히 규명하기 어려워, 지질 모델링은 구조적 불확실성을 반영한 자원 평가와 개발 의사결정을 위한 핵심 기반이 된다(Caers, 2011).

전통적인 지구통계학적 모델링은 정상성을 가정한 공간 통계에 기반하므로 복잡한 구조와 연결성을 충분히 표현하는 데 한계가 있다. 이점 통계 기반 기법은 국부적 연속성 재현에는 유리하지만 복잡한 구조 표현에 제약이 있고(Strebelle, 2002), 다점 통계(Multiple-Point Statistics, MPS)는 이를 일부 보완할 수 있으나 훈련 이미지의 대표성에 민감하고 대규모 3차원 문제에서는 계산 비용이 크다(Pyrcz & Deutsch, 2014). 객체 기반 모델링(Object-Based Modeling, OBM)은 지질학적으로 해석 가능한 3차원 구조를 생성할 수 있지만, 시추공 조건 반영이 제한적이고 조건 수가 증가할수록 계산 부담이 커진다(Li et al., 2023).

이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 생성형 인공지능 기반 지질 모델 생성이 활발히 연구되고 있다. 적대적 생성 신경망(Generative Adversarial Networks, GAN) 기반 방법은 3차원 암상 모델 생성과 조건화에 활용되어 왔고(Kim et al., 2024; Park et al., 2025; Jo et al., 2020), 최근에는 보다 안정적인 학습과 우수한 생성 품질을 제공하는 diffusion 모델이 유망한 대안으로 주목받고 있다(Di Federico & Durlofsky, 2024; Lee et al., 2025). 그러나 현장 규모의 3차원 지질 모델 생성은 여전히 높은 계산 비용과 메모리 요구량으로 인해 어렵다. 특히 실제 현장에서는 활용 가능한 참조모델 수가 매우 제한적이므로, 제한된 자료만으로 공간 구조를 학습하는 단일 이미지 기반 생성 모델링이 중요한 대안이 된다. Single Image GAN (SinGAN)은 가능성을 보여주었으나(Liu et al., 2025; Park et al., 2025), 적대적 학습 기반이라는 특성으로 인해 학습 안정성과 광역 구조 재현에는 한계가 있다. 이를 보완한 Single Image Diffusion Model (SinFusion)은 이와 같은 한계를 일부 완화하였지만(Park et al., 2026), 현장 규모의 3차원 지질 모델에 직접 적용하기에는 여전히 공간 규모와 계산 비용 측면

*Corresponding Author : honggeun.jo@inha.ac.kr

1) 인하대학교 에너지자원공학과

2) 한국가스공사

의 제약이 있다.

이에 본 연구에서는 제한된 학습 자료 환경에서 현장 규모의 3차원 채널 저류층 모델 생성을 위해 패치 기반 확산 모델링 기법을 적용한다. 단일 객체 기반 참조 모델로부터 중첩된 3차원 패치를 추출하고, 위치 임베딩을 포함한 확산 모델을 통해 국부적 채널 구조와 공간적 이질성을 학습한다. 또한 생성 단계에서는 추론 효율을 높이기 위한 샘플링 기법과 인페인팅 기반 패치 결합 전략을 적용하여 패치 간 일관성을 확보하고, 현장 규모 저류층 모델 생성 가능성과 제안 방법의 지질학적 재현성 및 계산 효율성을 평가하고자 한다.

본 문

Denoising Diffusion Probabilistic Models (DDPM)

최근에는 복잡한 지질 구조와 공간적 이질성을 재현할 수 있는 생성형 인공지능 기반 지질모델링이 주목받고 있다. DDPM은 데이터에 가우시안 노이즈를 단계적으로 추가하는 정방향 확산 과정과, 이를 제거하며 원본을 복원하는 역방향 생성 과정을 학습하는 확률 기반 생성 모델이다(Ho et al., 2020). 학습 시에는 각 시간 단계에서 노이즈가 추가된 입력 x_t 와 시간 정보 t 를 바탕으로 U-Net이 주입된 노이즈 성분을 예측하도록 훈련되며, 생성 시에는 순수 노이즈 x_T 에서 시작해 노이즈를 반복적으로 제거하며 최종적으로 원본과 유사한 샘플 x_0 을 복원한다. 정방향 확산 과정은 Eq. 1과 같이 표현된다.

$$x_t = \sqrt{\alpha_t} x_0 + \sqrt{1 - \alpha_t} \epsilon \quad (1)$$

여기서 x_t 는 시간 단계 t 에서의 노이즈가 추가된 이미지, x_0 은 원본 이미지, α_t 는 시간 단계 t 까지 누적되며 원본 이미지의 정보가 유지되는 정도를 나타내며, ϵ 는 이미지에 추가되는 가우시안 노이즈를 의미한다. 역방향 생성 과정은 Eq. 2와 같이 표현되며, 노이즈가 포함된 현재 단계의 이미지 x_t 로부터 이전 단계의 이미지 x_{t-1} 를 점진적으로 복원하는 과정이다.

$$x_{t-1} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_t}} \left(x_t - \frac{1 - \alpha_t}{\sqrt{1 - \alpha_t}} \epsilon_\theta(x_t, t) \right) + \sigma_t z \quad (2)$$

이때 x_{t-1} 는 시간 단계 $t-1$ 에서의 이전 단계에서 복원된 이미지이며, α_t 는 현재 단계에서 이전 이미지의 정보가 유지되는 비율을 나타내는 계수이다. 또한, $\epsilon_\theta(x_t, t)$ 는 신경망이 예측한 노이즈 성분, σ_t 는 역방향 복원 과정에서 추가되는 확률적 노이즈의 크기를 조절하며, z 는 복원 과정에서 사용되는 표준 가우시안 노이즈를 의미한다.

DDPM은 안정적인 학습과 높은 품질을 제공하지만, 일반적으로 충분한 학습 데이터가 요구된다. SinFusion은 이러한 한계를 보완하기 위해 제안된 단일 이미지 기반 확산 생성 모델로, 하나의 이미지나 비디오만으로도 확산 모델 학습이 가능하다(Nikankin et al., 2022). 이 방법은 단일 훈련 이미지에서 다양한 크롭과 부분 표본을 반복적으로 구성해 학습 데이터를 만들고, 원본의 주요 공간 패턴과 구조를 유지한 새로운 샘플을 생성한다(Fig. 1). 따라서 SinFusion은 활용할 수 있는 지질모델이 매우 제한적인 경우에 적용 가능한 현실적 생성 접근법이 될 수 있다.

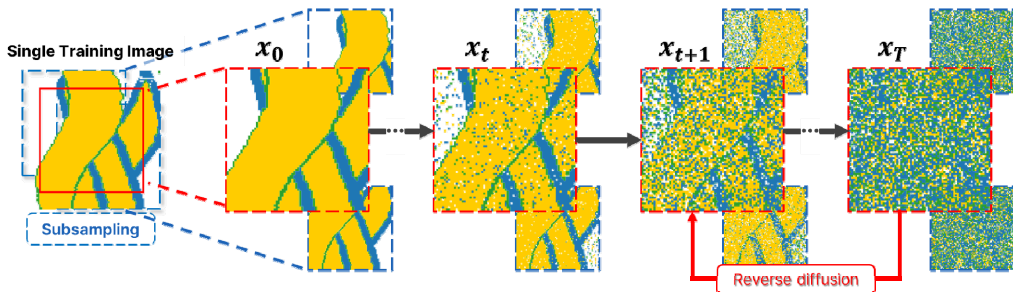


Fig. 1. Schematic illustration of the SinFusion training and generation process

Spatially Conditioned Patch-based Diffusion Modeling (SCPD)

기존 SinFusion은 주로 단일 이미지를 대상으로 제안된 방법이므로, 이를 현장 규모의 3차원 지질 모델 문제에 적용하기에는 계산 효율이 낮고 현장 규모로 확장하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 단일 이미지 기반 확산 모델의 개념을 백만 셀 이상의 대규모 지질 모델 생성에 적용하기 위해, Yang et al. (2025)의 patch-based diffusion 개념을 바탕으로 전체 영역을 중첩되는 소규모 패치 단위로 분할하고 이를 학습 및 생성에 활용하는 구조를 도입하였다. 현장 규모 3D 모델을 한번에 처리하면 메모리 사용량과 계산 복잡도가 급격히 증가하므로, 입력 볼륨을 여러 개의 국소 패치로 나누어 학습 데이터로 구성하고 각 패치의 전역 위치 정보를 함께 반영하여 공간적 문맥을 유지하도록 하였다. 또한 생성 단계에서는 이미 생성된 인접 패치를 참고하면서 순차적으로 다음 패치를 복원하거나 결합함으로써 패치 간 불연속을 줄이고 전체 구조의 일관성을 확보하고자 하였다(Fig. 2).

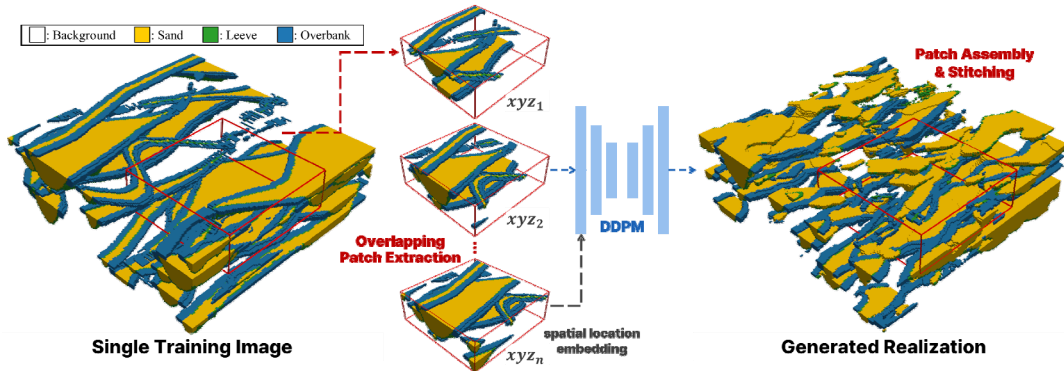


Fig. 2. Schematic illustration of the proposed spatially conditioned patch-based diffusion framework

Denoising Diffusion Implicit Models (DDIM)

DDPM은 안정적인 학습이 가능하지만, 수백~수천 단계의 역방향 샘플링이 필요해 생성 속도가 느리다. 이에 본 연구에서는 대규모 3차원 패치 생성의 효율을 높이기 위해 DDIM을 생성 단계에 적용하였다(Song et al., 2020). DDIM은 DDPM의 학습 구조를 유지하면서도 중간 단계를 건너뛸 수 있는 비마르코프적 샘플링을 통해 적은 step만으로 빠른 추론을 가능하게 한다. DDIM의 샘플링 식은 Eq. 3와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{t-1} = \sqrt{\alpha_{t-1}} \hat{x}_0 + \sqrt{1 - \alpha_{t-1} - \sigma_t^2} \epsilon_\theta(x_t, t) + \sigma_t \epsilon_t \quad (3)$$

여기서 \hat{x}_0 는 현재 상태 x_t 로부터 복원한 원본 이미지 추정값, σ_t 는 샘플링 시 추가되는 확률적 노이즈의 크기를 의미한다. 따라서 DDIM은 patch-based SinFusion의 계산 효율을 높이면서도 대규모 3차원 지질 구조의 생성을 실용적으로 수행하기 위한 효과적인 샘플링 기법으로 활용될 수 있다.

단일 대규모 지질모델 기반 생성 결과

본 연구에서는 복잡한 하성퇴적환경을 반영한 FLUFSIM 기반의 3차원 채널 모델을 참조모델로 활용하였다. FLUFSIM은 채널 사암(channel sand), 자연 제방(levee), 범람원(overbank), 비저류층(background shale)과 같은 퇴적 요소를 구현하여 채널의 곡률, 연속성, 적층 양상을 표현할 수 있다(Deutsch & Tran, 2002). 본 연구에서는 $192 \times 192 \times 64$ 크기의 원본 모델을 $64 \times 64 \times 32$ 크기의 중첩 패치로 분할하여 학습 데이터로 활용하였다.

학습된 모델을 이용하여 총 100개의 3차원 지질 모델을 생성하였다. Fig. 3(a)는 원본 참조모델의 3차원 채널 구조를 보여주며, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)는 제안한 patch-based diffusion model로 생성한 예시 모델이다. 생성 모델들은 원본에서 나타나는 channel sand의 연속성, 연결 양상, 그리고 levee 및 overbank의 공간적 배치를 전반적으로 잘 재현하였다. 동시에 세부 형상과 국부적 전개 양상에서는 차이를 보여, 제안한 방법이 원본의 지질학적 특성을 보존하면서도 다양한 3차원 구조를 생성할 수 있음을 확인하였다.

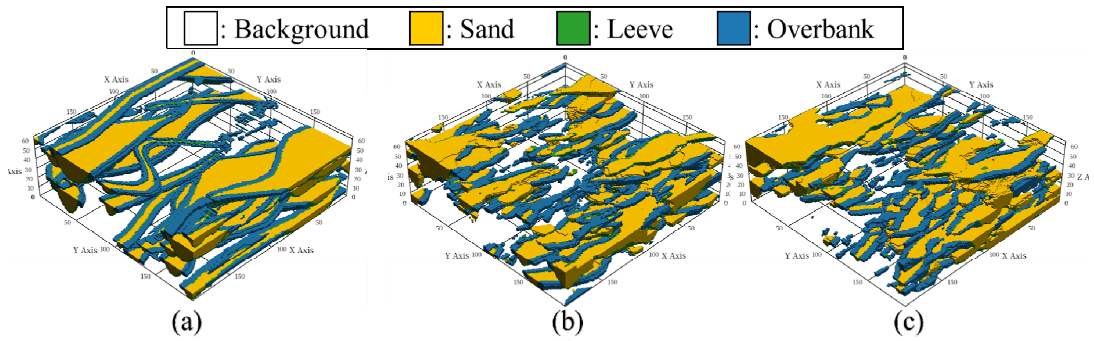


Fig. 3. Original reference model (a) and reservoir realizations (b, c) generated by the proposed model

Fig. 4(a)는 원본 모델과 100개의 생성 모델에 대한 다차원 척도법(Multidimensional Scaling, MDS) 결과를 나타내며, 원본 모델이 생성 모델 분포 내부에 위치하고 있음을 보여준다. 이는 생성된 지질 모델들이 원본의 구조적 특성을 전반적으로 반영함과 동시에, 저차원 공간에서 원본 모델을 포함한 넓은 영역에 분포함으로써 특정 구조에 편중되지 않은 형태로 다양하게 생성되었음을 시사한다. Fig. 4(b)는 생성 모델들의 암상 비율 분포를 나타내며, 각 암상의 비율이 전반적으로 유사한 범위에서 유지되고 원본 모델의 암상 비율 역시 해당 분포 범위 내에 위치함을 보여준다. 이는 제안한 모델이 채널 구조와 연결성뿐 아니라 전역적인 암상 조성 특성 또한 함께 보존하고 있음을 의미한다. 또한 모델 학습에는 약 9시간이 소요되었고, $192 \times 192 \times 64$ 크기의 3차원 모델 1개 생성에는 약 7분이 소요되었다. 이러한 결과는 제안한 방법이 대규모 3차원 지질 모델 생성에서 계산 효율성과 실용성을 동시에 확보할 수 있음을 보여준다.

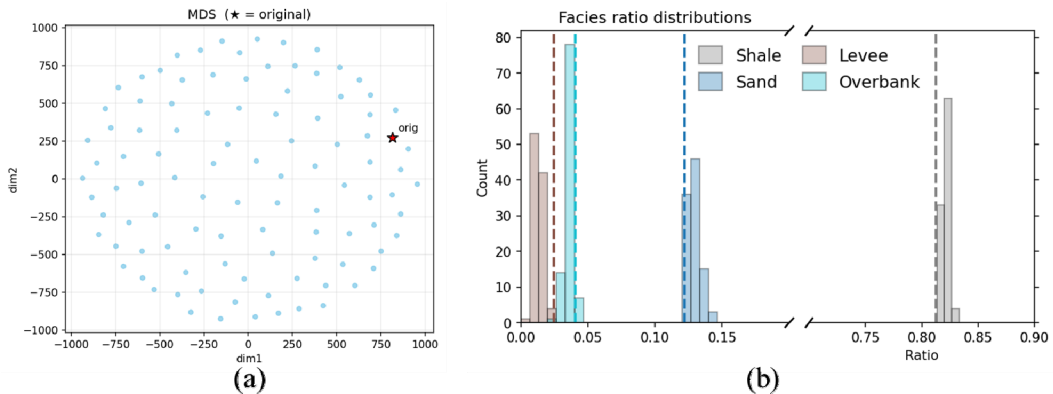


Fig. 4. Quantitative evaluation of the generated realizations: (a) MDS embedding of the original model and 100 generated realizations, (b) facies ratio distributions of the generated realizations and the original model.

결론

본 연구에서는 단일 참조모델만으로도 약 200만 셀 이상 현장 규모의 3차원 채널 저류층 구조를 효율적으로 생성할 수 있는 Spatially Conditioned Patch-based Diffusion Modeling을 제안하였다. 단일 객체 기반 모델을 중첩된 3차원 패치로 분할하여 학습하고, 위치 임베딩을 통해 공간적 문맥을 반영하였으며, 생성 단계에서는 DDIM 기반 샘플링과 inpainting 기반 패치 결합 전략을 적용하여 계산 효율과 패치 간 구조적 일관성을 확보하였다. 그 결과, 원본 참조모델의 채널 연속성을 전반적으로 잘 재현하면서도 다양한 지질 모델을 생성할 수 있음을 보여주었다. 또한 모델당 약 7분의 생성 시간은 본 방법이 대규모 지질 모델 생성에 실용적으로 적용될 수 있음을 시사한다. 따라서 본 연구는 제한된 학습 자료 환경에서도 단일 참조모델을 활용한 현장 규모 3차원 지질 모델 생성 가능성을 제시하였다.

사사

본 연구는 한국가스공사의 지원(RD2025-0071, 생성형 AI 기반 지질모델 특성화 공정 제작)으로 수행되었습니다.

References

- Caers, Jef. 2011. *Modeling Uncertainty in the Earth Sciences*. John Wiley & Sons.
- Deutsch, C. V., and Toan Thai Tran. 2002. "FLUVSIM: A Program for Object-Based Stochastic Modeling of Fluvial Depositional Systems." *Computers & Geosciences* 28(4):525-35.
- Eaton, Timothy T. 2006. "On the Importance of Geological Heterogeneity for Flow Simulation." *Sedimentary Geology* 184(3-4):187-201.
- Di Federico, Guido, and Louis J. Durlofsky. 2024. "Latent Diffusion Models for Parameterization and Data Assimilation of Facies-Based Geomodels." *ArXiv Preprint ArXiv:2406.14815*.
- Ho, Jonathan, Ajay Jain, and Pieter Abbeel. 2020. "Denoising Diffusion Probabilistic Models." *Advances in Neural Information Processing Systems* 33:6840-51.
- Jo, Honggeun, Javier E. Santos, and Michael J. Pyrcz. 2020. "Conditioning Well Data to Rule-Based Lobe Model by Machine Learning with a Generative Adversarial Network." *Energy Exploration & Exploitation* 38(6):2558-78.
- Kim, Hyunmin, Hyundon Shin, and Honggeun Jo. 2024. "Uncertainty Quantification Based on Deep-Learning Approach Integrating Time-Lapse Seismic Data for Geological Carbon Storage." *Lithosphere* 2024(4):lithosphere_2024_209. doi:10.2113/2024/lithosphere_2024_209.
- Lee, Daesoo, Oscar Ovanger, Jo Eidsvik, Erlend Aune, Jacob Skauvold, and Ragnar Hauge. 2025. "Latent Diffusion Model for Conditional Reservoir Facies Generation." *Computers & Geosciences* 194:105750.
- Li, Wanbing, Shaohua Li, Jinbiao Yu, and Jinghua Shi. 2023. "A Well Conditioning Method of Object-Based Models." *Interpretation* 11(1):SA115-25.
- Liu, Lei, Eduardo Maldonado-Cruz, Honggeun Jo, Maša Prodanović, and Michael J. Pyrcz. 2025. "Data Conditioning for Subsurface Models with Single-Image Generative Adversarial Network (SinGAN)." *Mathematical Geosciences* 1-20.
- Morris, Paul D., Zoltán Sylvester, Jacob A. Covault, David Mohrig, and Jerry L. Jensen. 2025. "The Impact of Reservoir Architecture on Dynamic Connectivity in Sinuous Deep-Water Channel Systems." *Interpretation* 13(3):T607-28.
- Nikankin, Yaniv, Niv Haim, and Michal Irani. 2022. "SinFusion: Training Diffusion Models on a Single Image or Video." *ArXiv Preprint ArXiv:2211.11743*.
- Park, E, D. Kim, J. Eo, J. Yoon, H. Lee, and H. Jo. 2025. "Generative AI-Driven Geological Modeling II: Uncertainty Quantification through SinGAN-Based Augmentation." in *2025 Fall Joint Conference of KSMER · KSRM · KSEG · KSPE*.
- Park, E., H. Lee, J. Yoon, and H. Jo. 2026. "SinFusion-Based Geological Model Augmentation and Well Data Integration." in *EGU General Assembly 2026*. Vienna.
- Park, E, Kim H, Shin, H, and Jo, H. 2025. "Deep Learning-Assisted THM-Integrated InSAR Modeling for CO2 Storage Characterization and Surface Deformation Forecasting." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 147:104461.
- Pyrcz, Michael J., and Clayton V Deutsch. 2014. *Geostatistical Reservoir Modeling*. Oxford University press.
- Song, Jiaming, Chenlin Meng, and Stefano Ermon. 2020. "Denoising Diffusion Implicit Models." *ArXiv Preprint ArXiv:2010.02502*.
- Strebelle, Sebastien. 2002. "Conditional Simulation of Complex Geological Structures Using Multiple-Point Statistics." *Mathematical Geology* 34(1):1-21.
- Yang, Taewon, Jason Hu, Jeffrey A. Fessler, and Liyue Shen. 2025. "Local Patches Meet Global Context: Scalable 3D Diffusion Priors for Computed Tomography Reconstruction." *ArXiv Preprint ArXiv:2512.18161*.

지질학적 불확실성을 고려한 심층 강화학습 기반 유정배치 최적화

조우성¹⁾, 김도균²⁾, 김영창¹⁾, 최종근^{3)*}

Well Placement Optimization under Geological Uncertainty using Deep Reinforcement Learning

Woosung Jo¹⁾, Dogyun Kim²⁾, Youngchang Kim¹⁾ and Jonggeun Choe^{3)*}

초 록

본 연구는 지질모델이 변경되는 경우에도 유정배치 의사결정을 수행할 수 있는 심층 강화학습 방법을 제안하였다. 일반적으로 지질모델이 변경될 때마다 유정배치 최적화를 다시 수행해야 하므로 계산비용이 증가한다. 이를 해결하기 위해 유정배치 의사결정 규칙을 학습하는 강화학습 에이전트를 설계하였다. 2차원 수공법 개발 문제를 대상으로 생산정과 주입정을 배치하도록 학습하였으며 3개 지질모델에서 유정배치 성능을 평가하였다. 평균 순현재가치는 85 백만 달러로 나타났으며 입자군집 최적화 결과인 72 백만 달러와 비슷한 수준을 보였다.

주요어: Well placement optimization, Deep reinforcement learning, Geological uncertainty, Waterflooding, Feature-based action representation

서 론

유전개발계획은 유정의 위치, 종류, 운영조건, 시추 시점과 같은 다양한 의사결정 변수를 포함하며 이러한 변수들은 저류층 회수율과 사업 경제성에 직접적인 영향을 미친다. 특히 유정배치는 저류층 내 유체흐름을 결정하는 핵심 설계변수로 알려져 있다. 가능한 유정배치 조합의 수가 매우 크기 때문에 이 문제는 일반적으로 저류층 시뮬레이션 기반 최적화 문제로 다루어지며 유전 알고리즘이나 입자군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO)와 같은 전역 최적화 기법이 널리 활용되어 왔다(Kim et al., 2022; Son et al., 2023; Yang et al., 2017).

실제 저류층에서는 제한된 정적자료로 인해 지질학적 불확실성이 존재한다. 이를 고려하기 위해 여러 지질모델을 생성하여 분석을 수행하며, 생산 및 압력 자료가 축적되면 히스토리매칭을 통해 저류층 모델이 지속적으로 업데이트된다(Ahn and Choe, 2025; Lee et al., 2024). 특히 유정배치 결과는 지질모델의 공간적 특성에 민감하게 영향을 받기 때문에 모델이 변경될 경우 최적의 유정배치 또한 달라질 수 있다. 이러한 환경에서는 지질모델이 업데이트될 때마다 유정배치 최적화를 다시 수행할 필요가 있다. 그러나 기존 최적화 방법은 많은 저류층 시뮬레이션을 요구하므로 반복적인 최적화를 수행하기에는 계산비용 측면의 한계가 존재한다.

본 연구에서는 지질모델이 변화하는 환경에서도 유정배치 최적화를 반복 수행하지 않고 의사결정을 수행할 수 있는 심층 강화학습 방법을 제안하였다. 기존 강화학습 기반 유정배치 연구에서는 격자좌표를 직접 선택하는 방식으로 유정배치 행동을 정의하였다(He et al., 2022; Nasir et al., 2020; Zhang et al., 2024). 이러한 방식은 특정 지질모델에서 학습된 위치 선택 패턴에 의존하므로 새로운 지질모델에 대해서는 기존 모델과 유사한 위치를 제시하는 한계가 있다. 본 연구에서는 특정 위치의 물리적 특징정보를 기반으로 유정배치 행동을 정의하여 강화학습 에이전트가 유정배치 의사결정 규칙을 학습하도록 하였다.

*Corresponding Author : johnchoe@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지시스템공학부

2) 서울대학교 에너지자원신기술연구소

3) 서울대학교 에너지자원공학과

본론

강화학습 에이전트는 저류층 시뮬레이터와 상호작용하며 유정배치 의사결정을 수행하고 보상을 기반으로 정책을 학습한다. 상태는 시추 의사결정 시점의 저류층 상태를 나타내며 유체투과율 분포, 시추 순서 이력, 압력, 수포화도, 그리고 생산정과 주입정에 대한 Diffusive Time of Flight (DTOF) 정보를 포함한다. 보상은 해당 유정을 추가함으로써 증가하는 순현재가치로 정의하였다.

유정배치 성능평가는 순차 가우스 시뮬레이션을 이용하여 생성된 지질모델을 대상으로 수행하였다. 그림 1은 강화학습의 학습 및 평가 과정을 나타낸다. 학습에는 총 10개의 지질모델을 사용하였으며 학습된 에이전트는 서로 다른 유체투과율 분포를 가지는 3개의 지질모델에서 성능을 평가하였다. 그림 2는 시험에 사용된 지질모델의 유체투과율 분포를 시각화한 예를 보여주며 평가에 고려된 지질모델 간 공간분포 차이를 나타낸다.

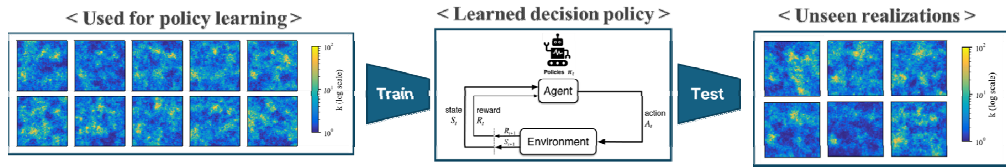


Figure 1. Reinforcement-learning workflow for training and testing under geological uncertainty.

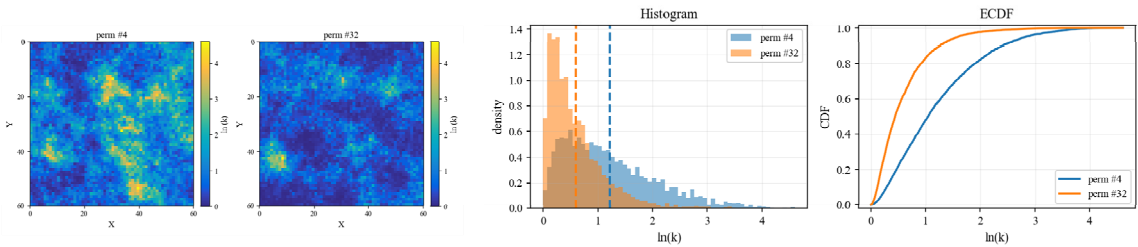


Figure 2. Comparison of two unseen permeability realizations used for evaluation.

그림 3은 제안한 강화학습 방법과 PSO를 이용하여 얻은 유정배치 결과를 비교한 것이다. 그림 3(a)는 제안한 방법을 통해 결정된 유정배치를 나타내며 그림 3(b)는 동일한 지질모델에 대해 PSO를 적용하여 얻은 결과를 나타낸다. 표 1은 3개의 지질모델에 대한 최종 순현재가치를 정리한 결과이다. 제안한 방법은 모든 모델에서 PSO와 비교하여 유사한 수준의 순현재가치를 달성하였다. 평균 순현재가치는 85 백만 달러로 PSO의 평균 순현재가치인 72 백만 달러와 비슷한 수준의 결과를 보였다.

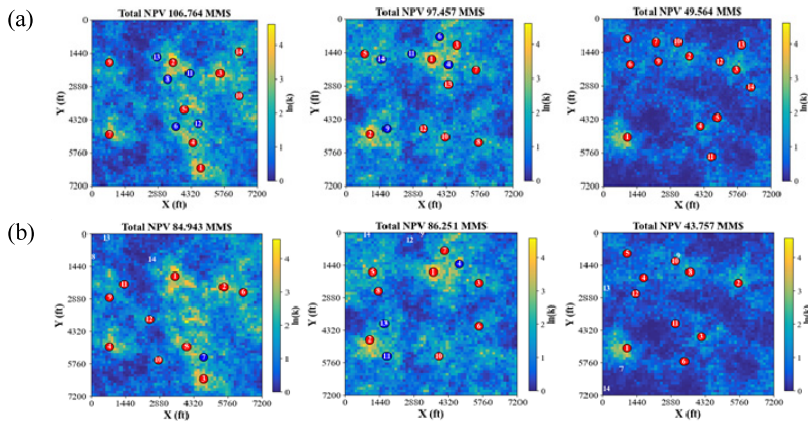


Figure 3. Well-placement decisions obtained by (a) the proposed method and (b) PSO.

Table 1. Final net present values (MM\$) for the six unseen geological realizations.

Model	Test #1	Test #2	Test #3	Mean	Std. Dev.
Proposed method	106.8	97.4	49.6	84.6	25.0
PSO	84.9	86.2	43.8	71.6	19.7

결론

본 연구에서는 지질모델이 변경되는 경우에도 유정배치 최적화를 반복 수행하지 않고 의사결정을 수행할 수 있는 심층 강화학습 기반 유정배치 방법을 제안하였다. 격자좌표 대신 저류층 상태를 설명하는 특징정보를 이용하여 유정배치 행동을 정의하였으며 이를 통해 서로 다른 지질모델에서도 적용 가능한 유정배치 의사결정 규칙을 학습하도록 하였다. 여러 지질모델을 이용한 평가결과 제안한 방법은 안정적인 유정배치 결정을 수행하였으며 PSO와 유사한 수준의 순현재가치를 나타냈다.

사사

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP) 연구과제(RS-2025-16063236, “Development of an Integrated CCS System for Network Optimization and Safety Assurance”)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ahn, S. and Choe, J., 2025. Applications of geological features style mixing for reservoir history matching. *SPE Journal*, 30, 1651–1669. doi:10.2118/224437-PA.
- He, J., Tang, M., Hu, C. et al., 2022. Deep reinforcement learning for generalizable field development optimization. *SPE Journal*, 27, 226–245.
- Kim, J., Choe, J. and Lee, K., 2022. Sequential field development plan through robust optimization coupling with CNN and LSTM-based proxy models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209, 109887.
- Lee, Y., Kim, D., Jo, H. and Choe, J., 2024. Application of latent variable evolution for channel reservoir characterization using generative adversarial networks and particle swarm optimization. *Geoenergy Science and Engineering*, 240, 213016. doi:10.1016/j.geoen.2024.213016.
- Nasir, Y., Yu, W. and Sepehrmoori, K., 2020. Hybrid derivative-free technique and effective machine learning surrogate for nonlinear constrained well placement and production optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 186, 106726.
- Son, C., Lee, S., Kim, J. et al., 2023. Two-stage sampling scheme for a CNN-based well placement optimization of 3D benchmark reservoirs. *Geoenergy Science and Engineering*, 225, 211677.
- Yang, H., Kim, J. and Choe, J., 2017. Field development optimization in mature oil reservoirs using a hybrid algorithm. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156, 41–50.
- Zhang, K., Sun, Z., Zhang, L. et al., 2024. A maximum entropy deep reinforcement learning method for sequential well placement optimization using multi-discrete action spaces. *Geoenergy Science and Engineering*, 240, 213004.

CO₂ 저장소 부지 선별 및 평가를 위한 SRL 기반 평가체계

김경진^{1)*}, 김태우¹⁾, 윤병준¹⁾, Harya Dwi Nugraha²⁾

SRL-based Evaluation Framework for CO₂ Storage Site Screening and Assessment

Kyoungjin Kim^{1)*}, Teawoo Kim¹⁾, Byoungjoon Yoon¹⁾ and Harya Dwi Nugraha²⁾

초 록

CO₂ 지중저장을 위한 저장소 부지 선별 및 평가 과정의 체계화를 위해 Storage Readiness Level(SRL) 기반 평가 프레임워크를 제안한다. 제안된 방법은 저장소 탐사 및 개발 단계별 성숙도를 반영하기 위해 SRL1-SRL9 단계 구조를 적용하고, 지질구조 적합성, 저장용량, 주입성, 봉쇄성, 위험요인 등을 종합적으로 고려한 다기준 평가 체계를 구축하였다. 또한 정량적 점수화와 등급화를 통해 유망 구조의 상대적 우선순위를 도출할 수 있도록 하였다. 제안된 프레임워크는 동해 울릉분지 남서부 지역의 잠재적 저장구조에 적용하여 평가 절차와 활용 가능성을 검증하였다. 연구 결과, SRL 기반 평가체계는 초기 탐사 단계에서부터 개발 가능성 평가까지 일관된 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 CO₂ 저장소 탐사 및 부지선정의 객관성과 투명성을 향상시키는 방법론을 제시한다.

주요어: 이산화탄소 지중저장, Storage readiness level, 저장소 부지 선별, 위험도 평가

서 론

탄소중립 달성을 위한 핵심 기술로 CO₂ 지중저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술이 세계적으로 주목받고 있다. CCS 프로젝트의 성공적인 수행을 위해서는 대규모 CO₂를 장기간 안전하게 저장할 수 있는 지질학적 저장소의 확보가 필수적이다. 특히 저장소 탐사 초기 단계에서는 제한된 지질자료를 기반으로 잠재적 저장구조를 선별하고 개발 가능성을 평가하는 체계적인 방법론이 요구된다.

기존의 CO₂ 저장소 평가 연구는 저장용량, 지질구조 적합성, 폐쇄성(caprock integrity), 주입성(injectivity) 등 개별 요소 분석에 주로 초점을 두고 수행되어 왔다. 그러나 이러한 접근은 저장소 탐사 및 개발 단계의 성숙도를 종합적으로 반영하기 어렵고, 후보 구조 간 상대적 우선순위를 정량적으로 비교하는 데 한계가 있다.

최근 CCS 프로젝트의 단계적 성숙도를 평가하기 위해 Storage Readiness Level(SRL) 개념이 제안되었다. SRL은 초기 탐사 단계부터 상업적 저장 단계까지 저장소 개발의 준비도를 단계적으로 평가하는 체계로, CCS 프로젝트 관리 및 의사결정 지원에 활용될 수 있다.

본 연구에서는 SRL 개념을 기반으로 CO₂ 저장소 부지 선별 및 평가를 위한 정량적 평가 프레임워크를 제안하고, 이를 실제 잠재 저장구조에 적용하여 방법론의 활용 가능성을 검증하고자 한다.

본론

SRL 기반 평가 체계는 저장소 탐사 및 개발 단계의 성숙도를 반영하기 위해 SRL1-SRL9 단계 구조를 기반으로 설계되었으며, 본 연구에서는 초기 부지 선별 및 유망 구조 평가에 해당하는 SRL1-SRL4 단계를 중심으로 적용하였다.

먼저 SRL1 단계에서는 퇴적층 두께 및 저장 심도, 2) CO₂ 배출원으로부터의 거리, 3) 수심, 4) 단층 및 이전 지진 분포 및 5) 가용 자료를 포함한 다섯 가지 요소로 구성하였다. 이러한 기준을 통해 CO₂ 지중저장에 부적합한 지역을 초기 단계에서 배제하였다. SRL2 단계에서는 저장 가능성을 정량적으로 평가하기 위해 체적 기반 저장자원량 추정을 수행한다. 저장용량은 총 암석 부피(Gross Rock Volume, GRV), 공극률, CO₂ 밀도, 저장 효율계수를 이용한 체적 계산식을 기반으로 산정

*Corresponding Author : k.j.kim@kigam.re.kr

1) 한국지질자원연구원 탄소저장연구센터

2) Center for Sustainable Geoscience and Outreach, Universitas Pertamina

하였으며, 해상 CCS 프로젝트를 고려하여 최소 저장자원량 기준을 20 MtCO₂로 설정하였다. SRL3 단계에서는 CRS(Common Risk Segment) 기반 위험도 분석을 적용하여 저장용량(capacity), 주입성(injectivity), 폐쇄성(containment)을 포함한 세 요소에 대한 위험도를 평가한다. 각 요소에 대한 지질학적 조건을 분석하여 저위험, 중위험, 고위험 영역을 구분하고, 자료 신뢰도(Data Confidence Level)를 함께 고려하여 평가 결과의 신뢰성을 반영하였다. SRL4 단계에서는 총 12개의 기술적 평가 기준을 기반으로 정량적 점수화 및 우선순위 분석을 수행한다. 평가 항목은 1) 저장자원량, 2) 저장층 타입, 3) 저장층 연속성, 4) 저장층 유효 두께, 5) 투과도, 6) 압력 조건, 7) 덮개암 두께, 8) 단층 밀도, 9) 기존 시추공 존재 여부, 10) CO₂ 배출원으로부터의 거리, 11) 인프라 활용 가능성, 12) 수심 을 포함하며, 각 항목에 대해 가중치를 적용하여 후보 구조 간 상대적 우선순위를 도출하였다. SRL5 단계에서는 저장소 부지 정의(site definition)를 위한 평가를 수행한다. 기존 시추공 자료가 존재하는 경우에는 3차원 정적 지질모형을 구축하여 저장층의 구조와 저류 특성을 분석하고, 시추공 자료가 없는 경우에는 주요 위험요인에 대한 평가와 함께 탐사 시추 계획을 수립하여 추가 자료 확보 가능성을 검토한다. 이를 통해 저장소의 지질학적 구조와 저장 잠재성을 보다 구체적으로 정의한다. SRL6 단계에서는 저장소의 기술적 타당성을 검증하기 위해 동적 저류층 모델링과 주입 시나리오 분석을 수행한다. 이 단계에서는 CO₂ 주입 시 압력 변화와 주입률을 고려한 저류층 시뮬레이션을 수행하고, 덮개암 안정성 평가, 누출 가능성 분석, 주입정 설계 및 모니터링 계획(MVA) 수립 등을 통해 저장소의 안전성과 운영 가능성을 검토한다. SRL7 단계에서는 CO₂ 지중저장 프로젝트 수행을 위한 제도적·기술적 준비 상태를 평가한다. 환경영향평가(EIA) 수행, CO₂ 운송 인프라 계획 수립, 저장소 운영을 위한 규제 및 인허가 절차 검토, 이해관계자 협의 등 프로젝트 추진을 위한 제도적 기반을 마련하는 단계이다. SRL8 단계에서는 규제기관의 저장 허가 승인 및 최종 투자결정(Final Investment Decision, FID)을 포함한 프로젝트 승인 절차가 이루어진다. 이 단계에서는 CO₂ 지중저장 허가 취득, 환경영향평가 승인, 관련 규제 요건 충족 여부를 확인하며 프로젝트 수행을 위한 최종 의사결정이 이루어진다. SRL9 단계에서는 저장소 운영 준비가 완료된 상태로, 주입정 시공 및 모니터링 시스템 구축 이후 CO₂ 주입이 개시된다. 이 단계에서는 주입 운영과 함께 장기 모니터링 및 안전관리 체계가 적용되며, 실제 CO₂ 지중 저장이 수행되는 단계에 해당한다. 또한 제안된 평가체계는 Excel 기반 평가 플랫폼으로 구현하여 입력 자료에 따라 자동으로 점수 및 순위를 산출할 수 있도록 하였으며, 이를 통해 다양한 후보 구조에 대한 비교 평가가 가능하도록 하였다.

제안된 SRL 기반 평가체계는 국내 해상 퇴적분지를 대상으로 적용하여 CO₂ 지중저장 잠재성을 평가하였다. 평가 대상은 서해, 남해, 동해에 분포하는 총 18개의 퇴적분지이며, SRL1 단계 평가 결과 서해 군산분지 동소분지(Eastern Gunsan Basin, EGB), 남해 남해도 소분지(Namhaedo sub-basin, NSB), 남해 드래곤 소분지(Dragon sub-basin, DSB) 및 울릉분지 남서대륙붕(Southwestern shelf of Ulleung Basin, SWSUB)을 포함한 네 개 지역이 CO₂ 지중저장 가능성이 있는 지역으로 선별되었다. SRL2 단계에서는 기존 CCS 종합평가 자료를 활용하여 저장자원량을 산정한 결과, 선별된 네 지역 모두 최소 저장용량 기준인 20 MtCO₂를 초과하는 것으로 나타났다. SRL3 단계에서는 CRS 기반 위험도 분석을 수행하여 잠재지역을 도출하는 과정으로, 군산분지 동소분지 및 울릉분지 남서대륙붕 지역은 CRS 분석을 기반으로 하여 잠재지역이 도출된 바 있으므로 SRL3를 통과하였다. 하지만 남해 남해도 및 드래곤 소분지의 경우 기 분석 결과가 전체 퇴적분지를 대상으로 하였고 CRS 분석을 통한 잠재지역 도출이 이루어지지 않아 SRL2 단계에 위치하였다. SRL4 단계에서는 울릉분지 남서대륙붕 지역에서 도출된 여섯 개 유망 구조에 대해 정량적 점수화 및 우선순위 분석을 수행하였다. 평가 결과, 일부 구조는 저장용량, 주입성 및 봉쇄성 측면에서 높은 점수를 나타내어 우선적인 정밀 평가 대상 구조로 도출되었다. 또한 일부 구조에서는 기존 시추공 자료 및 3차원 지질모형을 활용한 정적 모델링이 가능하여 SRL5 단계로의 발전 가능성이 확인되었다. 결과적으로 동해 고갈가스전의 경우 SRL6 단계에 부합되었고 나머지 5개의 유망구조의 경우 SRL5단계에 위치하는 것을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 CO₂ 저장소 부지 선별 및 평가를 위한 SRL 기반 평가 프레임워크를 제안하였다. 제안된 방법은 저장소 개발 단계의 성숙도를 반영한 평가 체계를 통해 후보 구조의 상대적 우선순위를 정량적으로 도출할 수 있도록 한다. 제안된 평가체계를 실제 잠재 저장구조에 적용한 결과, 구조별 저장 잠재성을 체계적으로 비교할 수 있었으며 초기 탐사 단계에서 유망 구조를 선별하는 데 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 SRL 기반 평가체계는 CO₂ 저장소 탐사 및 부지선정 과정의 객관성과 일관성을 향상시키는 도구로 활용될 수 있으며, 향후 다양한 CCS 프로젝트의 초기 단계 부지 선별 및 의사결정 지원 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업(CO₂ 수송-주입-저장-모니터링 원천기술 및 연계기술 개발; GP2025-021) 및 산업통상자원부의 R&D사업(CCS 통합 시스템 네트워크 최적화 및 안전성 확보 기술 개발; No. RS-2025-16063236)의 지원으로 수행되었습니다.

이산화탄소 배관 수송 시스템 설계 및 경제성 평가 모델 개발

조윤희¹⁾, 정훈영^{2)*}

Development of a Design and Techno-Economic Evaluation Model for CO₂ Pipeline Transport Systems

Yoonhee Cho¹⁾ and Hoonyoung Jeong^{2)*}

초 록

탄소중립 정책 확산에 따라 탄소 포집·활용·저장 기술과 이산화탄소 수송 인프라 구축의 중요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 배관 설계, 다단 압축 공정, 에너지 소비, 비용 및 온실가스 배출량을 통합적으로 산정하는 이산화탄소 배관 수송 평가 모델을 개발하였다. 제안된 모델은 수송 조건과 물질 변화를 반영하여 API 5L 기반 배관 규격을 산정하며, 압축 공정 설계와 열역학 해석을 통해 압축기, 펌프, 냉각기의 에너지 소비량을 정량화 한다. 또한, 에너지 사용량을 기반으로 비용과 온실가스 배출량을 산출함으로써 경제성 및 환경 영향을 동시에 고려한다. 수송 거리와 수송량 등 운전 조건에 따른 시나리오 분석을 통해 설계 변수와 비용 변화를 신속하게 평가할 수 있으며, 이는 초기 개념 설계 단계에서 기술적·경제적 의사결정을 지원하는 실용적인 통합 분석 도구로 활용될 것으로 기대된다.

주요어: CCUS, 배관 수송, 배관 설계, 비용 평가, 다단압축공정

서 론

최근 글로벌 기후 위기 대응을 위한 온실가스 감축 전략의 일환으로 탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 기술의 중요성이 증가하고 있다. CCUS 기술은 발전소 및 산업 공정에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 지중에 저장하거나 활용함으로써 온실가스 배출을 실질적으로 저감할 수 있다. 이 과정에서 포집된 이산화탄소를 저장지 또는 활용 지점까지 안정적으로 이송하는 수송 인프라 구축은 CCUS 전체 밸류체인 경제성과 효율성을 결정짓는 핵심 요소 중 하나이다. 특히, 배관 수송은 선박 수송 대비 1000km 이내의 단거리 및 중거리 대규모 이산화탄소 수송 시에 경제적으로 유리한 것으로 알려져 있다.

그러나 효율적인 이산화탄소 배관 수송 시스템 설계를 위해서는 유체의 복잡한 열역학적 상변화 특성을 고려해야 하며, 설계 압력과 유량에 따른 배관 규격 산정 및 안전성 검증 등 다양한 공학적 요소가 필수적으로 고려되어야 한다. 기존 연구들은 주로 특정 공정이나 수송 조건에 대한 비용 산정에 국한된 경우가 많으며, 수송 전과정의 경제성 및 온실가스 배출량을 통합적으로 분석할 수 있는 모델은 제한적인 실정이다.

따라서 본 연구에서는 초기 개념 설계 단계에서 신속하고 객관적인 의사결정을 지원하기 위한 ‘이산화탄소 배관 수송 시스템 설계 및 기술·경제성 평가 통합 모델’을 개발하였다. 본 모델은 유동 해석 기반의 배관 직경 산정 알고리즘을 구현하고, API 5L 표준 규격을 적용하여 실무적 활용도를 높였다. 또한, 다단 압축 공정의 열역학 모델을 연동하여 설비별 에너지 소비량을 정량화하였으며, 이를 기반으로 자본 비용, 운영 비용 및 온실가스 배출량을 통합적으로 산출할 수 있도록 구성하였다. 본 연구의 결과물은 향후 국내의 CCUS 프로젝트의 경제성 검토 및 최적 수송 시나리오 수립을 위한 기초 도구로 활용될 것으로 기대된다.

*Corresponding Author : hoonyoung.jeong@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정

2) 서울대학교 에너지자원공학과 교수

본 론

본 연구에서 개발된 이산화탄소 배관 수송 평가 모델은 복잡한 변수를 단순화하고, 설계 초기 단계의 신속한 의사결정을 지원하기 위해 다음과 같은 기본 가정을 설정하였다. 첫째, 수송 유체는 불순물이 포함되지 않은 100% 순수 이산화탄소로 간주한다. 둘째, 배관 경로는 출발지부터 목적지까지 고도 변화가 없는 단일 직선 수평 배관으로 가정하여 수송 중 정수압 변화에 따른 변수를 제외하였다. 셋째, 모든 공정 내 유동은 시간적 변화가 없는 정상 상태(Steady State)로 가정하여 해석을 수행하였다.

배관 설계 모델은 입력된 이산화탄소 질량 유량과 수송 압력 조건을 기반으로 최소 배관 내경을 도출한다. 레이놀즈 수와 마찰 계수를 산출하고, Darcy-Weisbach 식을 활용하여 주어진 수송 조건 내에서 요구되는 배관 내경을 산정한다. 정확도를 높이기 위해 수렴 조건에 도달할 때까지 반복 계산(iteration)을 수행한다.

결정된 내경을 바탕으로 부식 허용 두께와 내압을 견딜 수 있는 최소 배관 두께를 도출한다. 이후 API 5L 표준 배관 규격 중 최소 배관 내경과 두께 조건을 만족하는 배관 규격을 선택한다. 선정된 배관 규격에 대하여 내부 압력에 대한 파열(burst)조건과 해상의 경우 외부 수압에 의한 좌굴(collapse) 조건을 추가로 검토함으로써 육·해상 수송 환경에서의 구조적 안전성 및 설계 신뢰성을 확보하였다.

이산화탄소를 초임계 또는 고압 액체 상태로 수송하기 위한 압축 공정 모델은 다단 압축과 중간 냉각(Inter-cooling) 과정을 포함한다. 각 단계의 압축 과정은 등엔트로피 변화를 가정하되, 압축기 효율(Isentropic efficiency)을 반영하여 소비 전력을 계산한다. 압축기 후단에는 냉각기를 배치하여 토출 온도를 제어하며, 엔탈피 변화량을 통해 제거해야 하는 열부와 전력 소비량을 계산하였다. 특히, 온도 및 압력 조건에 따라 기체 압축기와 액체 펌프의 특성을 구분하여 열역학 해석을 수행함으로써, 임계점 부근의 급격한 물성 변화를 반영한 정밀한 에너지 소비량 도출이 가능하도록 구축하였다.

경제성 평가 모델은 자본 비용과 운영 비용으로 구분된다. 배관과 관련된 자본 비용은 선정된 배관 규격에 따른 배관 구매 비용, 코팅 비용, 설치 비용이 있으며, 해상 배관의 경우 음극 보호(Cathodic Protection) 설비 비용이 추가로 발생한다. 장비와 관련된 자본 비용은 장비 용량에 따라 경험식 등을 이용하여 구매 비용을 산출한다. 운영 비용은 연간 전력 소비량에 따른 전력 비용과 배관 및 장비 유지보수 비용을 포함된다. 아울러 본 모델은 에너지 소비량에 따른 간접 온실가스 배출 계수를 적용하여 수송 과정의 온실가스 배출량을 정량화한다. 이를 통해 단순한 경제적 분석을 넘어 CCUS 기술의 탄소 저감 효율을 통합적으로 평가할 수 있는 분석 환경을 제공한다.

결 론

본 연구에서는 이산화탄소 배관 수송 시스템의 최적 설계와 경제성 및 환경 영향을 통합적으로 평가할 수 있는 분석 모델을 개발하였다. 제안된 모델은 API 5L 표준 규격 기반의 배관 설계 알고리즘과 다단 압축 공정의 열역학 해석을 연동하여, 초기 개념 설계 단계에서 요구되는 기술적·경제적 지표를 신속하게 도출할 수 있도록 구축되었다.

본 연구의 주요 결과 및 기대효과는 다음과 같다.

첫째, 이산화탄소 상(Phase)에 따른 배관 내경 식을 적용하여 수송 조건별 배관 직경 및 두께를 산정하였으며, 파열 및 좌굴 검토를 통해 육상 및 해상 수송 환경에서의 구조적 신뢰성을 확보하였다.

둘째, 다단 압축 및 인터쿨링 공정 해석을 통해 설비 효율에 따른 실제 소비 전력을 정량화하였으며, 이를 운영 비용 및 간접 온실가스 배출량 산정에 직접 연동함으로써 분석의 정밀도를 높였다.

셋째, 동해가스전 CCS 프로젝트 시나리오(연간 1.2만톤, 수송 거리 60km, 수심 150m)를 적용하여 최적 배관 규격과 다단압축공정을 설계하였으며, 이에 따른 경제성 및 온실가스 배출량을 성공적으로 산출하였다.

넷째, 개발된 모델은 질량 유량, 수송 거리, 수심 등 주요 설계 변수에 따른 민감도 분석을 신속하게 수행할 수 있어 다양한 운전 조건에 대한 최적 시나리오 수립이 가능하다.

본 모델은 기존 연구들이 개별적으로 다루었던 배관 유동 해석과 경제성 및 환경 영향 평가를 하나의 플랫폼으로 통합했다는 점과 필요에 따라 부분적 활용이 가능한 점에서 차별성을 가진다. 개발된 도구를 향후 국내외 CCUS 프로젝트 추진 시, 다양한 운전 조건 및 환경적 변수에 따른 최적 수송 시나리오를 수립하고 합리적인 의사결정을 지원하는 실용적인 분석 도구로 활용될 것으로 기대된다.

향후 이산화탄소 내 불순물 영향이나 지형 고도 변화에 따른 부스터 펌프 설치 등 모델의 범용성을 확대할 수 있을 것이며, 나아가 이산화탄소 저장 기술과의 연계를 통해 CCS 전주기를 아우르는 통합 분석 도구를 구축하고자 한다.

사 사

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업의 지원을 받아, 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단이 수행한 결과물입니다.(과제번호 RS-2025-02213131)

이 논문은 2025년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-16063236, CCS 통합 시스템 네트워크 최적화 및 안전성 확보 기술 개발)

References

- DNV (Det Norske Veritas), 2012. DNV-ST-F101: Submarine pipeline systems. Hovik, Norway.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG), 2002. Transmission of CO_2 and energy. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, UK, PH4/6, 1-140.
- Kaiser, M.J., 2019. The offshore pipeline construction industry and activity modeling in the US Gulf of Mexico. Bureau of Ocean Energy Management (BOEM), OCS Study BOEM 2019-021, 1-356
- Knoope, M.M.J., Guijt, W., Ramírez, A. and Faaij, A.P.C., 2014. Improved cost models for optimizing CO_2 pipeline configuration for point-to-point pipelines and simple networks. International Journal of Greenhouse Gas Control, 22, 25-46.
- McCoy, S.T. and Rubin, E.S., 2008. An engineering-economic model of pipeline transport of CO_2 with application to carbon capture and storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2(2), 219-229.
- National Energy Technology Laboratory (NETL), 2023. FECM/NETL CO_2 transport cost model. U.S. Department of Energy, DOE/NETL-2023/3855, 1-84.
- Ogden, J.M., 2006. Techno-economic models for carbon dioxide compression, transport, and storage & correlations for estimating carbon dioxide density and viscosity. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, UCD-ITS-RR-06-06, 1-35.

경사형 지열히트펌프 설계인자 최적화

정병민¹⁾, 정대인²⁾, 김영주³⁾, 정훈영¹⁾*

Optimization of Inclined Closed-loop Geothermal Heat Pump Design Variables

Byungmin Chung¹⁾, Daein Jeong²⁾, Yeongju Kim¹⁾ and Hoonyoung Jeong³⁾*

초 록

지열히트펌프는 지중의 안정적인 온도를 활용하여 높은 효율을 달성할 수 있는 냉난방 기술로, 지중 열교환기 설치 각도에 따라 수직형, 수평형, 경사형으로 나뉜다. 일반적으로 활용되는 수직형 및 수평형 지열히트펌프는 설치 공간에 따른 제약이 커서 적용 확대에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 경사형 지열히트펌프가 활용될 수 있다. 이때, 경사형 지열히트펌프의 성능 및 경제성은 지중 순환 유체의 속도, 열교환기 길이, 개수 및 각도와 같은 설계 인자 값에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 경사형 지열히트펌프의 경제성을 향상시키기 위하여 설계 인자의 최적화를 수행하였다.

이를 위해 지중 열교환기 시스템과 히트펌프 시스템 모사하는 수치 해석 모델을 개발하고, 지중 열교환기 길이와 각도, 지중 순환 유체 속도, 채움재 열전도도, 전기 비용을 주요 변수로 설정하여 성능 및 비용에 대한 영향을 분석하였다. 인자 영향 분석 결과, 지중 순환 유체 속도, 지중 열교환기 길이 및 각도에 대한 총 비용 곡선은 최적값의 존재와 탐색의 필요성을 시사하였다. 개발된 수치 해석 모델을 기반으로 입자군집최적화 기법을 적용하여 경사형 지열히트펌프 설치 및 25년 운영의 총 현재 비용을 최소화하는 최적 인자 조합을 도출하였다.

주요어: 경사형 지열히트펌프, 지중 열교환기, 수치 해석, 최적화

서 론

전 세계 이산화탄소 배출량은 약 37.8 Gt/yr에 이르며, 국제에너지기구는 2030년까지 2022년 대비 약 35% 감축이라는 목표를 제시하고 있다. 전체 에너지 소비 중 냉방 및 난방이 차지하는 비중은 약 50%로, 이는 이산화탄소 배출의 주요 원인 중 하나이다. 그러나 현재 지열에너지가 냉난방 에너지에서 차지하는 비중은 1% 미만에 불과하다. 따라서 전 세계적인 탄소 배출 저감을 달성하기 위해서는 지열에너지의 활용 확대가 필수적이다.

지열히트펌프는 천부 지열을 활용하는 냉난방 시스템으로, 냉방 시에는 지중 온도가 외기보다 낮고 난방 시에는 높다는 특성으로 인해 높은 에너지 효율을 보인다. 이러한 특성은 지열히트펌프를 기존 공기열원 기반 시스템보다 효과적인 대안으로 만든다. 특히 도심 지역에서의 건물 에너지 수요 증가를 고려할 때, 지열 기반 냉난방 시스템의 역할은 더욱 중요해지고 있다.

지열히트펌프 시스템은 지중에 설치되는 열교환기의 형상과 배치 방식에 따라 성능이 크게 좌우된다. 현재 도시 지역에서는 수직형 구조의 시스템이 널리 사용되고 있으나, 열 간섭을 방지하기 위해 일정 간격 이상의 설치가 요구되며, 이로 인해 넓은 설치 면적이 필요하다. 이러한 공간적 제약은 특히 토지 이용이 제한적인 고밀도 도시 환경에서 시스템 적용을 어렵게 만드는 주요 요인으로 작용한다.

이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로, 열교환기를 경사지게 설치하는 방식이 대안으로 고려될 수 있다. 경사 구조는 지중 깊이에 따라 열교환기 간 거리를 증가시키는 효과를 가지므로, 지표면에서는 보다 좁은 간격으로 설치가 가능하다. 이는 제한된 부지 조건에서도 지열 시스템을 효율적으로 적용할 수 있는 가능성을 제공한다.

결과적으로, 지열에너지 활용 확대를 위해서는 기존 시스템의 공간적 제약을 완화할 수 있는 새로운 설계 개념에 대한

*Corresponding Author : hoonyoung.jeong@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지자원신기술연구소

2) SLB

3) 서울대학교 에너지시스템공학부

검토가 필요하다. 특히, 도시 환경에서의 적용성을 고려한 열교환기 배치 방식에 대한 연구는 향후 지열 기반 냉난방 시스템의 보급 확대를 위해 중요한 과제로 판단된다.

본 론

경사형 지열히트펌프 시스템의 성능을 정량적으로 평가하기 위하여, 본 연구에서는 수치 해석 기반의 시스템 모델을 구축하였다. 해당 모델은 지중 열교환기 모듈과 히트펌프 모듈로 구성되며, 두 모듈의 연동을 통해 전체 지열히트펌프 시스템의 거동을 모사한다. 지중 열교환기 모듈은 지중 순환 유체가 열교환기를 따라 순환하면서 지반과 열을 교환하는 과정을 모사하며, 히트펌프 모듈은 순환 유체와 냉매 간의 열교환을 반영하여 시스템의 냉난방 성능을 평가하도록 구성된다. 이와 같이 구성된 통합 모델은 경사형 구조를 갖는 시스템의 열적 거동을 일관되게 분석할 수 있도록 한다.

구축된 수치 모델을 기반으로 주요 설계 변수에 대한 영향 분석을 수행하였다. 특히, 지중 순환 유체의 유속, 지중 열교환기의 길이, 그리고 열교환기 설치 각도를 변화시키며 시스템 성능 및 비용에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 각 설계 변수는 시스템 성능뿐만 아니라 비용에도 상이한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 변수 조합에 따라 비용 함수가 단조롭게 감소하지 않고 특정 조건에서 최소값을 갖는 경향이 확인되었다. 이는 단순한 설계 변수 선택만으로는 최적 설계 도출이 어려우며, 체계적인 최적화 과정이 필요함을 시사한다.

이에 따라, 장기 운영을 고려한 경제성 평가를 위해 25년 운영 기간 동안의 총 현재 비용을 목적함수로 설정하고, 입자 군집 최적화 기반의 이산 최적화를 수행하였다. 최적화 결과, 지중 순환 유체 유속, 지중 열교환기 길이, 그리고 설치 각도는 각각 특정 값으로 수렴하는 경향을 보였으며, 이는 시스템 성능과 비용 간의 균형을 고려한 최적 설계 조건으로 해석된다. 또한, 최적화 적용을 통해 목적함수 값이 기존 대비 $x\%$ 감소하는 것으로 나타나, 설계 변수 최적화가 시스템의 경제성 향상에 효과적임을 확인할 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 경사형 지열히트펌프 시스템의 성능과 경제성을 평가하기 위한 수치 해석 모델을 구축하고, 주요 설계 변수에 따른 영향을 분석하였다. 분석 결과, 지중 순환 유체의 유속, 지중 열교환기의 길이 및 설치 각도는 시스템 성능과 비용에 중요한 영향을 미치며, 변수 조합에 따라 비용 함수가 특정 최소값을 갖는 경향이 확인되었다. 이는 경사형 시스템 설계에 있어 체계적인 최적화가 필요함을 보여준다.

또한, 장기 운영을 고려한 최적화를 통해 설계 변수들이 일정한 최적값으로 수렴하는 경향을 보였으며, 이를 통해 시스템의 경제성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 특히, 최적화 적용 시 총 현재 비용이 감소하는 결과가 나타나, 설계 변수 최적화가 실질적인 비용 절감에 기여할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 경사형 지열히트펌프 시스템의 설계 및 적용 가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 기반을 제시하며, 향후 도시 환경에서의 지열에너지 활용 확대를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업의 지원을 받아, 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단이 수행한 결과물임 (과제번호 RS-2025-02213131)

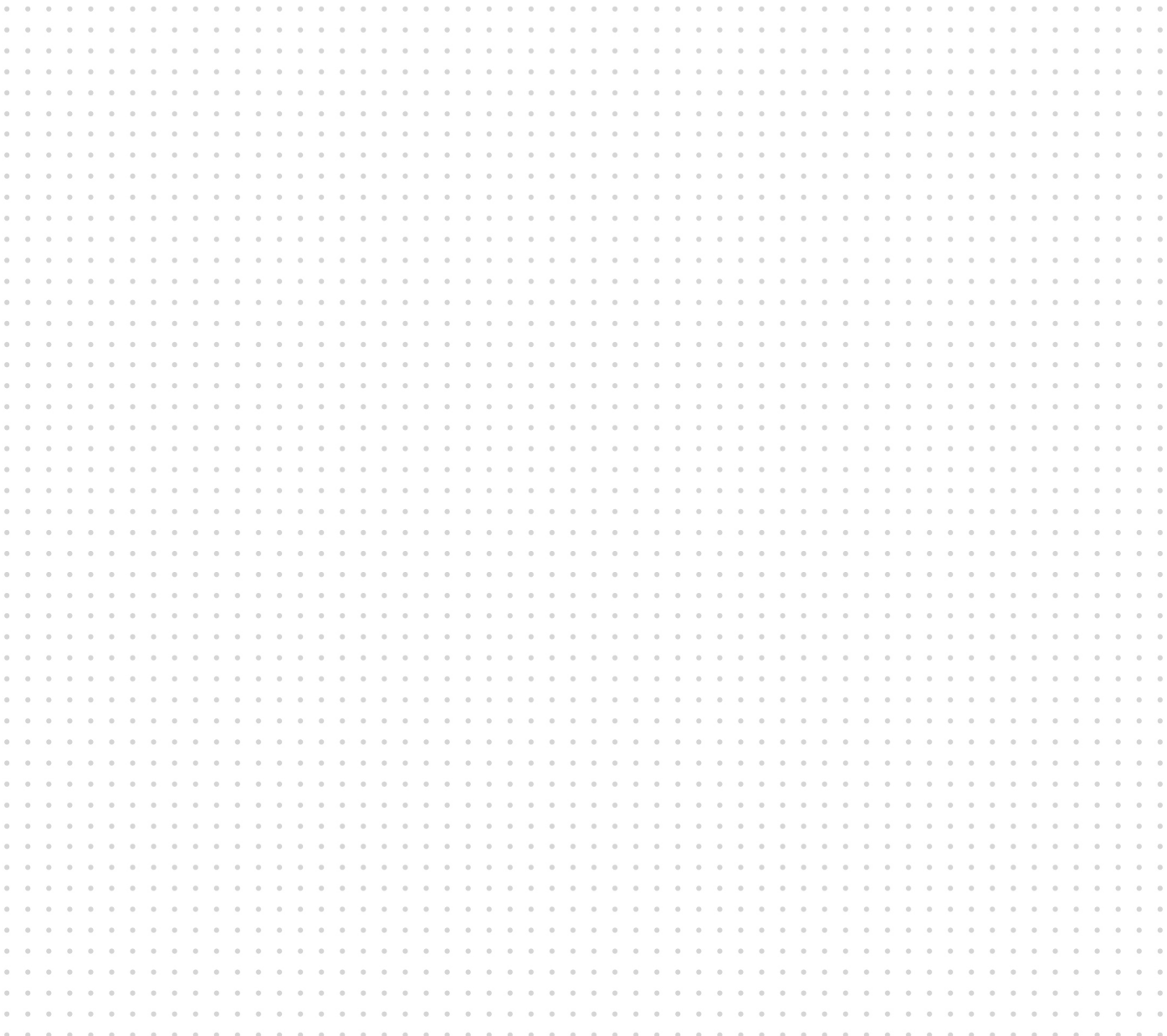
이 여녹는 2025년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-16063236, CCS 통합 시스템 네트워크 최적화 및 안전성 확보 기술 개발)

References

- P. Farzanehkhameh et al, 2020. Optimization and energy-economic assessment of a geothermal heat pump system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, Article 110282.
- S. Kim et al (2010). Field-scale evaluation of the design of borehole heat exchangers for the use of shallow geothermal energy. *Energy*, 35(2), 491-500.

포스터 세션

석유·가스 탐사, 개발, 생산(E&P)
탄소 포집, 활용, 저장(CCUS)



저류층 물성을 활용한 머신러닝 기반의 CO₂ 주입 가능성 평가

설정환¹⁾, 박은실¹⁾, 조흥근¹⁾, 신현돈^{1)*}

CO₂ Injectability Assessment Based on Machine Learning Using Reservoir Properties

Jeonghwan Seol¹⁾, Eunsil Park¹⁾, Honggeun Jo¹⁾ and Hyundon Shin^{1)*}

초 록

탄소 지중 저장(geological carbon storage, GCS)은 대기 중 CO₂ 저감을 위한 핵심 기술로, 주입 안정성 확보가 중요하다. 주입 초기 공저압(bottom-hole pressure, BHP)의 급격한 상승인 공저압 피크는 주입 안정성과 직결되는 중요한 현상이다. 본 연구에서는 공저압 피크 예측을 기반으로 CO₂ 주입 가능성을 평가하기 위해 머신러닝 모델을 적용하였다. 총 2,000개의 저류층 모델을 구축하고, 주요 물성을 균등 분포로 생성하여 학습 자료를 구성하였으며, 이상치를 제거한 1,977개 데이터를 활용하였다. 모델 비교 결과 XGBoost가 약 $R^2 = 0.83$, RMSE = 1.02 MPa로 가장 우수한 성능을 보였다. 또한 과소평가를 최소화하기 위해 가중 손실함수를 적용한 결과, 과소평가 비율이 감소하면서도 예측 정확도는 유지되었다. 이를 통해 다양한 저류층 조건에서 CO₂ 주입 가능성을 사전에 평가할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 탄소 지중 저장, 공저압 피크, CO₂ 주입 가능성 평가, 머신러닝

서 론

기후 변화 대응을 위한 핵심 기술인 탄소 지중 저장(geological carbon storage, GCS)은 CO₂를 저류층에 주입·저장하여 대기 중 농도 증가를 억제하는 기술이다(Albertz et al., 2023). 이때 저류층 압력 거동은 주입 안정성과 지층 파괴 위험성에 직접적인 영향을 미치며, 특히 주입 초기 수 일 이내에 공저압(Bottomhole pressure, BHP)이 급격히 상승하는 공저압 피크(peak BHP) 현상이 발생한다(Kim et al., 2018). 이러한 압력 거동은 주입정 인근의 유동 병목 현상과 낮은 CO₂ 상대 투과도 등 복합적인 요인에 의해 발생하며, 한계 압력 조기 도달에 따른 주입 강제 종료 및 목표 주입량 미달과 같은 문제를 초래할 수 있다.

공저압 피크를 완화하기 위해 단계적 주입이나 주입 중단을 통한 압력 완화와 같은 운영 전략이 제안되었으나(Kim et al., 2018; Kim et al., 2024), 기존 시뮬레이션 기반 접근은 높은 계산 비용과 물성 불확실성으로 인해 다양한 조건에 대한 반복적 평가에 한계를 가진다. 특히 초기 압력 거동은 짧은 시간과 좁은 영역에서 발생하여 미세한 물성 변화에도 매우 민감하게 반응하므로, 주입 가능성을 평가하기 위해서는 대량의 시뮬레이션이 요구된다. 이에 따라 다양한 저류층 조건에서의 압력 거동을 빠르게 예측하고 이를 기반으로 CO₂ 주입 가능성을 평가할 수 있는 접근이 필요하다.

또한 GCS에서는 단순한 예측 정확도보다 과소평가를 최소화하는 보수적 예측이 중요하다. 공저압을 실제보다 낮게 예측할 경우 지층 파괴 위험이 증가하는 반면, 과대평가는 안전 마진 확보에 기여한다. 따라서 본 연구에서는 공저압 피크를 기반으로 저류층의 CO₂ 주입 가능성을 정량적으로 평가하고, 현장 안전 중심의 보수적 예측을 수행하기 위한 가중 손실함수 기반 접근법을 제시하였다.

본 론

본 연구에서는 공저압 피크 예측을 통한 CO₂ 주입 가능성을 평가하기 위해 Park et al. (2025)를 참고하여 총 2,000개의 균질 저류층 모델을 구축하고 운영조건을 설정하였다. 각 모델의 입력 변수는 투과도, 공극률 등의 암석물리학적 인자와 더불어 대수층 인자, 상대투과도 인자, 주입정 손상 지수 등 14개의 주요 저류층 물성을 입력 변수로 설정하였으며, 각 변

*Corresponding Author : hyundon.shin@inha.ac.kr

1) 인하대학교 에너지자원공학과

수는 사전에 정의된 범위 내에서 균등 분포를 기반으로 무작위 생성하여 다양한 물성 조합을 반영하였다.

주입 운영의 물리적 타당성과 예측 모델의 신뢰성을 확보하기 위해, 저류층의 최대 허용 압력을 고려한 이상치 제거를 선행적으로 수행하였다. 구체적으로 공저압 피크가 30 MPa (modified from Park et al., 2025)을 초과하는 경우를 이상치로 정의하고 이를 제거하여, 최종적으로 1,977개의 데이터를 분석에 활용하였다. 이후 입력 변수 간 단위 차이로 인한 특정 변수의 과도학습을 방지하기 위해 표준화(normalization)를 수행하여 모델 적용의 안정성을 확보하였다.

비선형적 거동으로 나타나는 공저압 피크를 효과적으로 예측하기 위해 Random Forest (RF), Gradient Boosting (GB), XGBoost (XGB) 모델을 비교하였다. 모델 성능은 결정계수(R²)와 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)를 기준으로 평가하였다. 그 결과 XGB 모델이 가장 우수한 성능을 나타냈으며, GB 모델은 XGB 모델과 유사한 수준의 성능을 보였다. 반면 RF 모델은 상대적으로 낮은 성능을 나타냈다(Table 1). 이러한 결과를 바탕으로 공저압 피크를 기반으로 한 주입 가능성 평가에 가장 적합한 모델로 XGB 모델을 선정하였다.

Table 1. Comparison of R² and RMSE for each machine learning model

	RF	GB	XGB
R2	0.7533	0.8313	0.8333
RMSE [MPa]	1.04	1.02	1.02

주입 가능성 평가에서는 과소평가를 최소화하는 것이 중요하므로 XGB 모델의 학습 과정에 이를 반영하기 위해 과소평가에 더 큰 패널티를 부여하는 가중 손실함수를 적용하였다. 손실함수는 다음과 같이 정의하였다. 가중 손실함수를 정의함으로써 학습 과정에서 과소평가하는 결과가 나올 경우에는 패널티를 부여받아 과대평가하는 방향으로 학습을 하게 된다.

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i (y_{true} - y_{pred})^2$$

$$\omega_i = \begin{cases} \alpha, & \text{if } y_{true} > y_{pred} \quad (\text{underestimated}) \\ 1, & \text{(otherwise)} \end{cases}$$

여기서 L 은 손실함수 값, n 은 자료의 개수, y_{true} 와 y_{pred} 는 각각 시뮬레이션에서 얻은 실제 공저압 피크, 머신러닝 모델로 예측한 공저압 피크를 의미한다. α 는 과소평가에 대한 가중치로, 5-300 범위에서 변화시키며 성능 변화를 분석하였다.

가중 손실함수를 적용한 결과, 가중치가 증가할수록 과소평가 비율은 감소하는 경향을 보였으며, P50 기준 약 0.43에서 0.29 수준까지 감소하였다. 특히 가중치 100 이상 구간에서 감소 효과가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 1).

반면 RMSE는 약 1.02 MPa에서 최대 1.15 MPa 수준으로 소폭 증가하였고, R²는 약 0.83 수준에서 큰 변화 없이 유지되었다. 이는 예측 정확도의 큰 저하 없이 보수적 예측이 가능함을 의미한다.

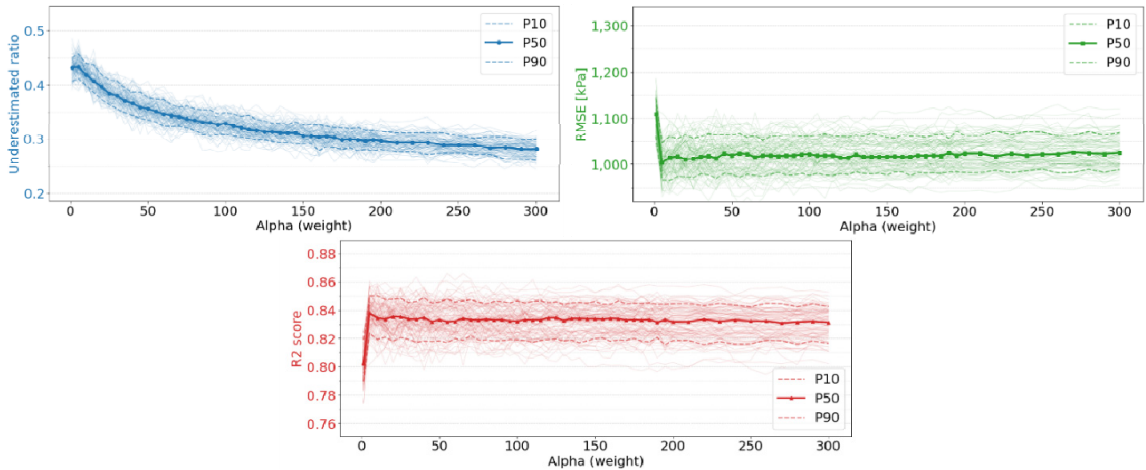


Fig. 1. Change of evaluation metrics with increasing weight (α) (left: underestimated ratio, right: RMSE, lower: R^2)

결론

본 연구에는 다양한 저류층 물성 조건에서 발생하는 공저압 피크를 정량적으로 예측하고, 이를 기반으로 CO_2 주입 가능성을 사전에 평가하기 위한 머신러닝 기반의 접근법을 제시하였다. 2,000개의 시뮬레이션 결과를 활용하여 머신러닝 모델을 비교한 결과, XGB 모델이 약 $R^2 = 0.83$, $\text{RMSE} = 1.02$ MPa로 가장 우수한 성능을 나타내어 비선형적 압력 거동 예측에 적합한 모델로 선정되었다.

특히 현장 운영의 안전 마진 확보를 위해 가중 손실함수를 도입하여 보수적 예측 성능을 강화한 결과, 과소평가 비율이 P50 기준 약 0.43에서 0.29 수준으로 크게 개선되었다. 이 과정에서 RMSE와 R^2 는 안정적으로 유지되어, 예측 정확도의 손실 없이도 현장에서 요구되는 보수적 평가가 가능함을 확인하였다. 이러한 결과는 제안된 모델이 단순히 수치를 맞추는 것을 넘어, 실제 주입 공정에서 발생할 수 있는 지층 파괴 및 운영 중단 리스크를 선제적으로 관리할 수 있음을 의미한다.

결론적으로, 본 연구에서 개발된 접근법은 복합적인 저류층 물성 조합에 따른 주입 가능 영역과 위험 영역을 신속하게 구분할 수 있는 실용적인 가이드라인을 제시한다. 이는 향후 GCS 현장의 주입 운영 조건 설계 및 리스크 기반의 의사결정을 지원하는 핵심적인 도구로 활용될 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 2026년도 정부의 재원으로 한국에너지기술평가원(RS-2025-16063236, CCS 통합 시스템 네트워크 최적화 및 안전성 확보 기술 개발)과 한국연구재단(RS-2025-25436989, Digital Rock 및 AI 기반 CO_2 지중저장 안정성·효율성 향상을 위한 지질매질 특성 분석 및 불확실성 정량화 기술 개발)의 지원을 받아 수행된 연구임

References

- Albertz, M., Stewart, S.A., and Goteti, R., 2023. Perspectives on geologic carbon storage, *Frontiers in Energy Research*, 10, 1071735.
- Kim, D., Kim, D., Jo, W., Choe, J., and Jo, H., 2024. Improved injection schedules of CO_2 for Pohang Basin, Yeongil Bay, South Korea: Regarding field security and injection effectiveness, *Lithosphere*, 2024(4), Article ID lithosphere_2024_176.
- Kim, N.H., Jung, H.S., Kim, G.D., Jeong, H., Shin, H., Kwon, Y.K., and Choe, J., 2018. The stability assessment of an aquifer in Pohang Yeongil Bay due to CO_2 injection, *Journal of Engineering Geology*, 28(2), 183-192.
- Park, E., Kim, H., Shin, H., and Jo, H., 2025. Deep learning-assisted THM-integrated InSAR modeling for CO_2 storage characterization and surface deformation forecasting, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 147, 104461.

저류층 시추 위치 최적화를 위한 프로세스 자동화

김건우¹⁾, 임수경²⁾, 양민서³⁾, 김재훈³⁾, 장일식^{4)*}

Advanced Process Automation for Well Placement Optimization

Gunwoo Kim¹⁾, Sookyung Lim²⁾, Minseo Yang³⁾, Jaehun Kim³⁾ and Ilsik Jang^{4)*}

초 록

본 연구에서는 머신러닝 기법을 활용하여 순현재가치(Net Present Value, NPV)를 극대화하는 다수 생산정의 시추 위치를 효율적으로 탐색하기 위한 자동화된 최적화 프로세스를 제안하였다. 최적 시추 위치 결정을 위해 multi-level grid 시스템을 적용하였으며, 이는 탐색 공간을 단계적으로 축소하면서 최적해에 수렴할 수 있도록 설계되었다. multi-level grid 설정 과정의 자동화는 입력 데이터의 일관성과 신뢰성을 확보하고 계산 효율성을 향상시키기 위해 필수적인 요소로 고려되었다. 이를 위해 파이썬 기반의 자동화 시스템을 새롭게 구축하였으며, 각 단계는 서로 다른 해상도의 탐색 전략과 평가 방식을 적용하도록 설계하였다. 제안된 자동화 시스템은 사용자 개입을 최소화하고 데이터 처리의 일관성을 유지함으로써 전체 워크플로우를 체계화하였으며, 그 결과 다중 유정 위치 최적화 문제에서의 탐색 효율성과 결과의 신뢰성을 동시에 향상시키는 것으로 나타났다.

주요어: NPV, 프로세스 자동화, Multi-level grid, 다중 유정 위치 최적화

서 론

정통적인 시뮬레이션 기반 최적화 기법은 저류층의 복잡한 물리적 거동을 정밀하게 반영할 수 있다는 장점이 있으나, 막대한 계산 비용과 시간이 요구된다는 한계를 가진다. 특히, 저류층의 비선형적 특성으로 인해 목적함수의 응답이 불규칙하게 나타나며, 이는 최적화 과정에서의 수렴 안정성을 저해하는 주요 요인으로 작용한다. 또한, 반복적인 시뮬레이션 수행이 요구되고 종료 시점의 설정이 명확하지 않다는 점에서 전체 계산 효율성이 크게 저하되는 문제가 존재한다.

Multi-level grid 시스템의 적용을 통한 최적화 과정에서, 초기 단계에서는 광역 탐색을 수행하고, 이후 단계로 진행될수록 탐색 영역을 점진적으로 축소 및 정밀화함으로써 계산 비용을 최소화하면서도 최적해 탐색 정확도를 향상시켰다. 그러나 각 level별 격자 시스템을 구축할 때, 기존 워크플로우에서는 격자 설계가 연구자의 주관에 의해서 결정되며, 입력 데이터 처리 및 시각적 검증 과정에서 발생할 수 있는 실수로 인해, 최종 시뮬레이션 결과의 신뢰도가 저하될 가능성이 존재한다. 이러한 요인들은 다중 유정을 동시에 고려해야 하는 복잡한 저류층 환경에서는 탐색 공간이 기하급수적으로 증가하여, 최적화 과정이 비효율적으로 진행될 수 있다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하고, 시추 위치 최적화 과정 전반에서의 사용자 개입을 최소화하기 위해, multi-level grid에 파이썬 기반의 자동화 프로세스 구축을 목표로 한다. 이를 통해, 다중 유정 위치 최적화 문제에서의 계산 효율성과 결과 신뢰성을 향상시키는 것을 목적으로 한다.

본 론

머신러닝 모델

본 연구에서는 생산정 시추위치에 따른 NPV 계산을 위해 인공신경망 모델을 적용하였다. 입력 변수로는 생산정 위치 좌표, 저류층 경계까지의 거리, 저류층 두께, 저류층 유체 투과율이 사용되었다. 목적 함수는 사업 기간 10년을 고려하여

*Corresponding Author : isjang77@chosun.ac.kr

- 1) 조선대학교 첨단에너지자원공학과 석사과정
- 2) 조선대학교 첨단에너지자원공학과 박사과정
- 3) 조선대학교 첨단에너지공학과 학사과정
- 4) 조선대학교 첨단에너지공학과 교수

NPV가 사용된다. ANN 예측 성능을 개선하기 위해 탐색 과정에서 생성되는 새로운 샘플 데이터를 반복적으로 학습에 반영하였다. 이를 통해, 저류층 시뮬레이션 대리모델이 탐색 단계가 진행될수록, 점진적으로 정교화되며, 탐색 공간을 단계적으로 축소하는 효과를 얻을 수 있도록 구성하였다(Fig. 1).

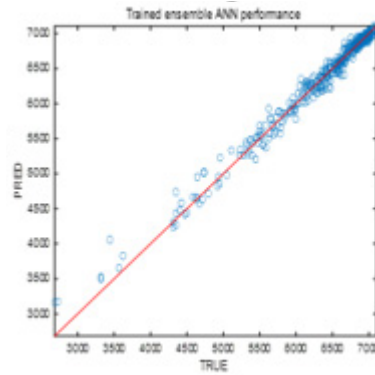


Fig. 1. ANN model for prediction of reservoir performance.

프로세스 자동화

Multi-level grid 시스템의 단계별 grid 시스템 구축을 자동화하기 위한 과정을 Fig.2에 도시하였다. Step 1은 level 1 grid system에 대해 ANN 모델을 사용하여 최적화 결과로서 상위 NPV가 나온 유정의 위치를 시각화한 것이다. 붉은색 점선으로 표시된 사각격자가 level 1 grid를 나타내며, 그 중심부의 붉은 점은 시추 가능 위치를 나타낸다. 이를 기반으로 외부 확장을 통해 다음 단계에서 고려해야 할 영역을 Step 2에 표시하였다. Step 3는 level 2 grid system을 적용할 경우 탐색 공간을 적합하게 포함시킬 수 있는 기준 영역을 결정한 것이며, 이를 기준으로 level 2 grids system을 적용한 것이 Step 4에 표현하였다. Step 5에서는 기준 영역을 제거한 후 Step 6와 같이 level 2 grid system 내의 시추 가능 위치를 표시할 수 있다. 이와 같은 과정을 파이썬 코드로 구현하여 활용하였다.

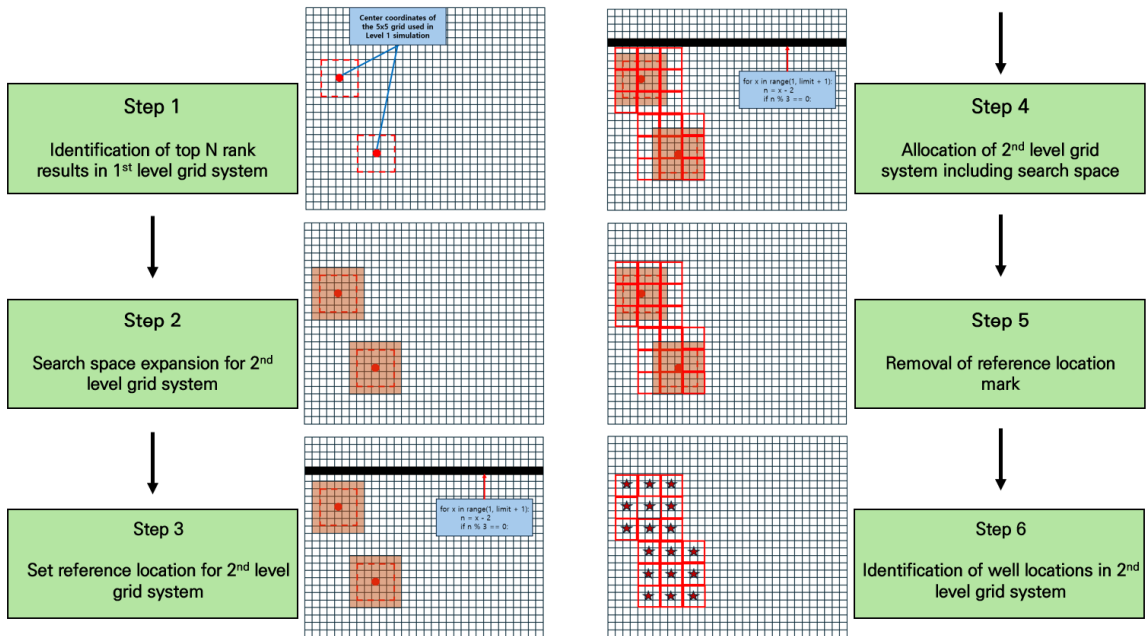


Fig. 2. Schematics of process automation.

결론

본 연구는 기존 워크플로우의 입력 데이터 처리 및 시각적 검증 과정에서 발생할 수 있는 실수로 인해 발생할 수 있는 여러 오류로 인한 전반적인 데이터 신뢰도 하락을 방지하기 위해 시추 위치 최적화 과정 전반에서의 사용자 개입을 최소화하며 결과적으로 데이터 신뢰도를 높이기 위해 Multi-level Grid 자동화 프로세스를 구축하였다.

본론에서 제시한 과정의 타당성과 정확도를 측정하기 위해 기존 워크플로우로 파생된 시뮬레이션 결과와 이번 연구를 통해 구축한 프로세스 자동화를 통한 시뮬레이션 결과의 유정 위치 및 시뮬레이션 횟수를 비교하였다. Table 1과 2는 5개 유정의 위치 최적화 결과를 비교한 표이다.

Table 1. Comparison of manual and automated processes

Cases	Manual Process		Automated Process	
	# of Simulation	NPV(M\$)	# of Simulation	NPV(M\$)
1	1,885	7,433	2,049	7,289
2	1,597	7,424	1,599	7,418
3	1,801	7,418	1,735	7,425

Table 2. Comparison of required time for manual and automated processes

Level 1~3 (Process Stage)	Manual Process Time	Automated Process Time
Level 1	1 Hour	3 Minutes (Per Level)
Level 2	1 Hour	
Level 3	30 Minutes	

기존 워크플로우와 프로세스 자동화 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때 전체적인 시뮬레이션 횟수와 NPV에서 크게 차이가 없는 것을 확인하였다. 이를 통해 프로세스 자동화 과정에서 문제가 없음을 확인함과 동시에 기존 프로세스에서 생성된 유정 위치와 자동화 프로세스로 생성된 위치가 근사치에 있음을 확인하였다. 또 기존 프로세스에서 요구되는 시간과 프로세스 자동화를 통한 요구 시간을 비교하였을 때 90% 이상의 시간 절감을 보였으며, 시뮬레이션 전체 과정을 포함한 시간에서도 37%이상의 시간 절감을 확인하였다.

사사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20212010200010)을 받아 수행되었습니다.

References

Jang, I., Oh, S., Kang, H, Na, J., and Min, B., 2020, Multi-well placement optimization using sequential artificial neural networks and multi-level grid system, IJOGCT, Vol. 24, No. 4

기계학습기반 생산수 내 리튬농도 추정가능성 고찰

홍요셉¹⁾, 김하영¹⁾, 김지현²⁾, 정대인³⁾, 이경복^{1,4)*}

Machine-Learning-Based Estimation Model on Lithium Concentration in Produced Water

Yosep Hong¹⁾, Hayoung Kim¹⁾, Ji-Hyun Kim²⁾, Daein Jeong³⁾ and Kyungbook Lee^{1,4)*}

초 록

본 연구에서는 7개 주요이온(Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-})의 농도를 활용하여 생산수 내 리튬농도를 추정하는 기계학습 모델을 개발하였다. 캐나다 알버타 지역의 지화학분석자료 1,192건과 Extreme Gradient Boosting 알고리즘을 사용하였다. 양의 왜도를 보이는 리튬농도를 고려하여 35, 50, 75, 100 mg/L를 기준으로 학습, 검증 및 평가 자료를 계층 분할하였다. 개발된 모델은 평가자료에서 결정계수 0.793, 평균제곱근오차 12.456 mg/L 및 평균절대오차 6.854 mg/L의 성능을 보였다. 비록 75 mg/L 이상의 고농도 구간에서 일부 과소평가하는 경향이 있으나, 리튬 분석값이 부재한 기존 지화학분석자료에 즉각 적용할 수 있어 생산수 내 리튬농도 평가에 유용할 것으로 기대된다.

주요어: Lithium, Produced water, Machine-learning, Geochemistry, Alberta

서 론

탄소중립시대의 에너지전환기조에 따라 전기차 및 에너지저장장치에 대한 수요가 늘어나며 리튬자원 확보 중요성이 강조되고 있다. 국제에너지기구에 따르면 2040년 리튬수요는 2023년의 약 8배 수준까지 증가할 것으로 예상되어, 종래의 광산채굴과 염호증발 방식을 통한 리튬생산은 한계가 있다(IEA, 2024). 최근 직접리튬추출(direct lithium extraction) 기술 발전과 더불어 심부 지층수 및 유·가스전 생산수 내 용존리튬이온이 새로운 리튬자원 확보방안으로 주목받고 있다(Dugamin et al., 2021). 특히 캐나다 알버타지역의 지층수에서 최대 140 mg/L의 리튬농도가 보고되어 높은 유망성을 지닌 것으로 보고되었다(Eccles and Jean, 2013). 그러나 지층수 내 리튬농도는 지역적 지질특성에 따라 공간편차를 보이므로(Butler et al., 2025), 신뢰도 높은 자원평가를 위해선 조밀하고 방대한 자료확보가 필수적이다. 하지만, 과거 유·가스전에서 취득된 대부분의 지화학분석자료는 리튬농도가 부재하며, 생산수 샘플을 추가 취득하여 분석하는 데에는 방대한 시간과 비용이 소요된다. 이러한 한계를 보완하기 위해 Peng et al.(2025)은 지질정보와 주요이온농도를 기계학습에 활용하여 알버타 전역의 리튬농도를 예측하였다. 해당 연구는 격자단위의 리튬농도를 35, 50, 75 mg/L의 임계값을 기준으로 분류하는 문제로 접근하였다. 이러한 분류모델은 유망지역 식별에는 유용하지만, 격자와 임계값을 설정하면서 원본자료의 정보 손실이 발생할 뿐만 아니라, 리튬농도를 정량적으로 결정하지 못하므로 부존량 평가가 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 생산수 지화학분석자료의 주요이온(Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-})을 활용해 리튬농도(Li^+)를 직접 추정하는 기계학습모델을 개발하고자 한다. 이를 통해 추가적인 지층수 지화학분석 실험 없이도 기 분석된 유·가스전 생산수자료를 활용하여 유정단위로 리튬농도를 추정하고자 한다.

본 론

기계학습모델 개발에 사용된 자료는 캐나다 알버타 지질조사소(Alberta Geological Survey)에서 수집되었다. 전체 2,334개 생산수 지화학분석자료 중, 리튬농도와 주요이온의 농도가 모두 존재하는 자료 1,192건을 선별하였다. 선별된 지

*Corresponding Author : kblee@kongju.ac.kr

- 1) 국립공주대학교 지질환경과학과
- 2) 한국지질자원연구원 해저지질연구센터
- 3) SLB
- 4) 국립공주대학교 지구시스템연구소

화학분석자료의 리튬과 주요이온의 분포는 전반적으로 강한 양의 왜도를 보인다. 리튬농도 추정모델을 개발하기 앞서 Li^+ 와 주요이온 간 상관관계를 확인하였다. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- 가 Li^+ 와 0.6 이상의 높은 상관성을 보이며, 특히 K^+ 의 경우 0.8 이상으로 가장 높게 나타났다. 반면, HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 는 각각 -0.09와 0.25로 저조한 상관성을 보였다.

본 연구는 리튬농도 추정에 대한 가능성을 확인하기 위한 연구로 특징추출 과정없이, 7개 주요이온 전체를 리튬농도 추정모델의 입력자료로 사용하였다. 선별된 1,192건의 지화학분석자료를 모델의 학습(train), 검증(validation) 및 평가(test)를 위해 3:1:1의 비율로 분할하였다. 이때, 단순 무작위 분할이 아닌, 상업적 리튬자원의 잠재성 평가를 위한 기준농도(0-35, 35-50, 50-75, 75-100, 100 이상 mg/L)를 기반으로 계층별 추출을 수행하였다(Marza et al., 2024; Peng et al., 2025). 이를 통해 자료가 상대적으로 적은 고농도의 리튬자료가 특정 자료셋에 편향되는 것을 방지하고 모델의 일반화 성능을 확보하고자 하였다.

본 연구에서는 트리 기반 앙상블 기법인 Extreme Gradient Boosting(XGBoost)을 기계학습모델 알고리즘으로 선정하였다(Chen and Guestrin, 2016). XGBoost는 자료의 비대칭성에 강건하며 인자 간의 복잡한 상호작용을 파악하는데 탁월한 성능을 보이는 것으로 알려져, 양의 왜도를 보이는 지화학분석자료에 유효할 것으로 판단하였다. 또한, 그리드서치를 통해 모델의 파라미터(학습률, 최대깊이, 표본추출 비율, 트리별 특성추출 비율, 최소 자식가중치)를 최적화하였다.

최적화된 리튬농도 추정모델에 학습, 검증 및 평가 자료를 입력하여 실제 리튬농도와 추정된 리튬농도 간 결정계수(coefficient of determination, R^2), 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE)와 평균절대오차(mean absolute error, MAE)를 계산하여 모델의 성능을 평가하였다. 학습자료의 R^2 는 0.984, RMSE는 3.514 mg/L, MAE는 2.03 mg/L로 나타났으며, 검증자료에서는 R^2 는 0.801, RMSE는 12.386 mg/L, MAE는 6.837 mg/L로, 평가자료에서는 R^2 는 0.793, RMSE는 12.456 mg/L, MAE는 6.854 mg/L로 나타났다. 학습자료에 비해 검증 및 평가 자료의 R^2 는 낮고 RMSE와 MAE는 높게 나타나, 모델의 일반화 성능이 다소 낮고 학습자료에 과적합된 경향을 보이는 것으로 판단된다. 또한 모든 자료셋에서 RMSE가 MAE보다 높게 나타났으며, 이는 75 mg/L 이상의 고농도 자료에 대해 개발된 모델이 과소평가하는 경향 때문인 것으로 해석된다. 자료분할 과정에서 계층적 추출을 수행했음에도 불구하고 해당 고농도구간의 자료수가 99개로 전체자료 1,192개 대비 제한적이기 때문이다. 결과적으로 고농도 리튬에서의 학습이 충분히 이루어지지 않아 저조한 성능을 보이는 것으로 판단된다. 이를 개선하기 위해선 고농도 학습자료의 추가 확보 또는 이온농도와 더불어 지층수 분석자료가 취득된 위·경도 정보, 심도정보 및 지질정보를 입력자료로 추가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

개발된 리튬농도 추정모델의 변수중요도를 확인한 결과, Na^+ 의 중요도는 0.036, Ca^{2+} 는 0.066, K^+ 는 0.551, Mg^{2+} 는 0.026, Cl^- 는 0.208, HCO_3^- 는 0.078, SO_4^{2-} 는 0.034로 나타났다. 가장 높은 중요도를 보인 K^+ 는 상관관계 분석 결과와 일치하였다. 또한, 가장 낮은 상관관계를 보였던 HCO_3^- 가 K^+ 를 제외한 양이온보다 높게 나타난 것은, 모델이 Li^+ 와 HCO_3^- 의 비선형적 관계를 학습하였음을 의미한다. 반면, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등은 리튬과의 높은 상관성을 가짐에도 낮은 중요도를 보였는데, 이는 K^+ 나 Cl^- 과의 다중공선성으로 인해 모델 내에서 제공하는 정보의 중복성이 높았기 때문으로 해석된다. 따라서 입력인자에 대한 특징추출 과정을 통해 추정모델 성능개선이 필요할 것으로 보인다.

결론

본 연구에서는 캐나다 알버타 분지 생산수의 지화학분석자료 중 주요이온농도를 입력자료로 활용하여 생산수 내 리튬농도를 추정하는 XGBoost 기반의 기계학습모델을 개발하였다. 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 개발된 리튬농도 추정모델은 평가자료 기준 R^2 0.793, RMSE 12.456 mg/L, MAE 6.854 mg/L의 성능을 나타냈다. RMSE가 MAE보다 약 1.8배 높게 나타난 것은 특정 구간에서 발생하는 이상치의 영향이 지배적임을 시사하며, 특히 75 mg/L 이상의 고농도자료(99개)에 대한 학습부족으로 해당 구간에서 저조한 성능을 보이는 것으로 판단된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 향후 연구에서는 지화학자료 외에도 지리적 위치와 심도 및 지질학적 층서 정보를 추가로 반영하여 고농도 리튬에 대한 추정성능을 개선할 계획이다.

둘째, XGBoost의 변수중요도 분석결과, 리튬과 상관관계가 가장 높았던 K^+ 가 가장 높은 기여도(0.551)를 보여 리튬농도 추정의 핵심인자임을 확인하였다. 반면, 상관관계가 가장 낮았던 HCO_3^- 가 타 양이온보다 높은 중요도를 보인 것은 모델이 Li^+ 와 HCO_3^- 간의 비선형적 관계를 유효하게 학습했음을 의미한다. Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 는 높은 상관성에도 불구하고 다중공선성으로 인해 상대적으로 낮은 중요도를 나타냈다.

본 연구에서 제안한 연구방향을 토대로 추정모델의 성능을 개선한다면, 리튬분석값이 부재한 과거 유·가스전의 지화학분석자료에 즉각적으로 적용하여 리튬농도 추정이 가능하므로 추가 실험없이 유정 단위의 리튬자원 잠재성을 평가하는데

기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2025년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(RS-2025-148289, 동해대륙붕 세일층 CO2기밀성 및 저장성 나노기술기반 평가모델 개발)을 받아 수행되었습니다. 또한 2025년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(250000636)을 받아 수행된 연구입니다. S&P Global社의 지원을 받아 Accumap, Acculog, QEU\$TOR 등의 상용소프트웨어를 활용해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Butler, K.L., Munk, L.A., Boutt, D.F., Morris, N., Kennedy, J., Saha, P., Blake, M.R., Custado, M.J., and Ibarra, D.E., 2025. The Origin and Enrichment of Sedimentary Basin Lithium Brines: A Case Study From the Upper Devonian Leduc Formation, Alberta Basin, Canada. *Economic Geology*, 120(3), 639-662.
- Eccles, D.R., and Jean, G.M., 2013. Lithium Groundwater and Formation-Water Geochemical Data. *Alberta Geological Survey*, DIG 2010-0001.
- Dugamin, E.J.M., Richard, A., Cathelineau, M., Boiron, M.C., Despinois, F., and Brisset, A., 2021. Groundwater in sedimentary basin as potential lithium resource: a global prospective study. *Scientific Reports*, 11(1), 210921.
- IEA, 2024. Global Critical Minerals Outlook 2024. *International Energy Agency*, 7-12.
- Marza, M., Ferguson, G., Thorson, J., Barton, I., Kim, J., Ma, L., McIntosh, J., 2024. Geological controls on lithium production from basinal brines across North America. *Journal of Geochemical Exploration*, 257, 107383.
- Peng, X., Chen, Z., Jiang, C., Yuan, W., and Yao, J., 2025. A Data-Driven Approach for Exploring Unconventional Lithium Resources in Devonian Sedimentary Brines, Alberta, Canada. *Natural Resources Research*, 34, 1885-1900.

용해 트래핑을 고려한 물질평형방정식 기반 대수층 CO₂ 저장 용량 추정

박상건¹⁾, 김영주²⁾, 정훈영^{3)*}

Material Balance Approach for Estimating CO₂ Storage Capacity in Saline Sandstone Aquifers Considering Dissolution Trapping

Sangkeon Park¹⁾, Yeongju Kim²⁾ and Hoonyoung Jeong^{3)*}

초 록

이 연구는 대수층 내 CO₂ 저장 용량을 보다 정확히 산정하기 위해 용해 포집을 고려한 물질평형방정식(MBE) 방법을 제안한다. 기존 MBE는 구조 및 잔류 포집만 고려하여 압력 증가를 과대평가하고 저장 용량을 과소추정하는 한계가 있다. 제안된 방법은 합성 모델에서 1.76%의 상대오차를 보여 기존 MBE방법(7.18%) 대비 정확도가 향상되었으며, 다양한 조건에서도 일관된 성능을 확인하였다. 또한 Sleipner L9 모델 검증에서 1.53%의 오차를 나타냈다.

주요어: Carbon storage, CO₂ storage capacity, material balance equation

서 론

기후 변화 대응을 위한 온실가스 감축 전략에서 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)은 중요한 기술로 인식되고 있다. CCS 프로젝트의 성공적인 수행을 위해서는 대상 지층이 얼마나 많은 CO₂를 안전하게 저장할 수 있는지를 정량적으로 평가하는 것이 필수적이며, 특히 저류층 압력 증가가 저장 용량을 결정하는 주요 제한 요인으로 작용한다. 과도한 압력 상승은 지층 파괴나 유체 누출과 같은 문제를 유발할 수 있으므로 저장 용량 평가는 압력 제한 조건을 고려하여 수행되어야 한다.

지질학적 CO₂ 저장에서는 구조적 트래핑과 잔류 트래핑, 용해 트래핑이 주요 저장 메커니즘으로 작용한다. 구조적 및 잔류 트래핑은 CO₂가 공극을 직접 점유하여 압력 증가에 영향을 미치는 반면, 용해 트래핑은 CO₂가 염수에 용해되는 형태로 저장되므로 압력 증가에 미치는 영향이 상대적으로 작다. 이러한 차이에도 불구하고 기존 저장 용량 평가 방법에서는 용해 트래핑이 충분히 고려되지 않은 경우가 많다.

CO₂ 저장 용량 평가 방법으로는 저류층 시뮬레이션, 체적법, 해석법, 그리고 물질평형방정식(Material Balance Equation, MBE) 기반 방법이 있다. 이 중 물질평형방정식 방법은 비교적 단순한 계산으로 저장 용량을 추정할 수 있다는 장점이 있으나, 대부분의 기존 연구에서는 용해 트래핑을 고려하지 않았다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 CO₂ 용해 트래핑을 고려한 새로운 물질평형방정식 기반 저장 용량 추정 방법을 제안하고, 그 정확성을 평가하고자 한다.

본 론

본 연구에서는 CO₂ 주입 시 형성되는 저류층 내 유체 분포를 고려하여 물질평형방정식을 확장하였다. CO₂가 대수층에 주입되면 부력에 의해 상부로 이동하며 CO₂가 존재하는 영역과 염수 영역이 구분된다. CO₂가 존재하는 영역에서는 공극을 점유하는 CO₂와 함께 CO₂가 용해된 염수와 용해되지 않은 염수가 동시에 존재한다.

기존 MBE 방법은 공극 내 CO₂만을 고려하였으나, 본 연구에서는 염수에 용해된 CO₂를 포함하여 물질평형방정식을 구성하였다. 이를 위해 염수를 CO₂가 용해된 상태와 용해되지 않은 상태로 구분하고, 각 유체의 질량 및 부피 관계를 기반으로 전체 식을 정리하였다. CO₂ 용해도는 Henry의 법칙을 이용하여 계산하였으며, 압력, 온도, 염분의 영향을 반영하였다.

*Corresponding Author : hoonyoung.jeong@snu.ac.kr

- 1) 서울대학교 에너지시스템공학부 석박사통합과정
- 2) 포스코인터내셔널 가스기술그룹 대리
- 3) 서울대학교 에너지자원공학과 부교수

또한 CO₂와 염수의 물성은 Peng-Robinson 상태방정식과 기존 경험식을 이용하여 계산하였다.

평균 저류층 압력은 주입정 shut-in 이후의 공저압력을 이용하여 추정하였으며, CO₂ 존재 영역의 평균 포화도는 Buckley-Leverett 이론을 기반으로 계산하였다. 이러한 압력과 포화도 정보를 이용하여 원시 염수 부존량(Original Water in Place, OWIP)을 산정하고, 이를 바탕으로 CO₂ 저장 용량을 계산하였다. 저장 용량은 저류층 평균 압력이 허용 가능한 최대 압력에 도달할 때까지 주입 가능한 CO₂의 질량으로 정의하였다.

제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 합성 대수층 모델을 이용한 수치 실험을 수행하고, 상용 저류층 시뮬레이터(CMG GEM) 결과와 비교하였다. 합성 모델은 101×101×10 격자 구조를 가지며, 공극률 0.2, 수평 투과도 150 md 조건에서 CO₂를 일정 속도로 주입하였다.

그 결과, 제안된 물질평형방정식 방법은 CO₂ 저장 용량을 약 1.76%의 상대 오차로 추정하였으며, 이는 시뮬레이션 결과와 매우 높은 일치도를 보였다. 반면, 용해 트래핑을 고려하지 않는 기존 MBE 방법은 약 7.18%의 오차를 나타내어 상대적으로 낮은 정확도를 보였다. 이는 용해된 CO₂가 압력 증가에 미치는 영향이 작음에도 이를 고려하지 않을 경우 저장 용량이 과대 추정될 수 있음을 의미한다.

또한 다양한 조건에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, 제안된 방법은 CO₂ 포화도, shut-in 기간, 주입 속도, 공극률 및 투과도 변화 등 다양한 조건에서도 안정적인 저장 용량 추정 성능을 보였다.

추가적으로 Sleipner L9 모델에 적용한 결과, CO₂ 저장 용량 추정 오차는 약 1.53%로 나타났으며, 실제 대수층 조건에서도 높은 정확도를 유지하는 것으로 확인되었다.

결론

본 연구에서는 CO₂ 용해 트래핑을 고려한 물질평형방정식 기반 CO₂ 저장 용량 추정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존 방법의 한계를 개선하여 용해된 CO₂의 영향을 반영함으로써 보다 정확한 저장 용량 추정을 가능하게 한다.

합성 모델과 실제 대수층 모델에 대한 적용 결과, 제안된 방법은 낮은 오차로 저장 용량을 추정할 수 있었으며 다양한 조건에서도 안정적인 성능을 보였다. 이러한 결과는 제안된 방법이 복잡한 저류층 시뮬레이션 없이도 효율적으로 저장 용량을 평가할 수 있는 실용적인 접근 방법임을 보여준다.

향후 연구에서는 실제 현장 데이터를 활용한 추가 검증과 함께, 장기적인 저장 과정에서 중요한 광물 트래핑을 포함하는 방향으로 연구를 확장할 필요가 있다.

사사

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업의 지원을 받아, 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단이 수행한 결과물임.(과제번호 RS-2025-02213131)

이 논문은 2025년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임.(RS-2025-16063236, CCS 통합 시스템 네트워크 최적화 및 안전성 확보 기술 개발)

References

- IPCC, 2023. Climate Change 2023 Synthesis Report. Geneva.
- Vishal, V., Verma, Y., Chandra, D. and Ashok, D., 2021. A systematic capacity assessment and classification of geologic CO₂ storage systems in India. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 111, 103458.
- Oh, H., Yoon, H., Park, S., Kim, Y., Choi, B. and Sun, W., 2024. Estimation of CO₂ storage capacities in saline aquifers using material balance. *Fuel*, 374, 132411.
- Ringrose, P.S., Furre, A.K., Gilfillan, S.M.V., Krevor, S., Landrø, M. and Leslie, R., 2021. Storage of carbon dioxide in saline aquifers: Physicochemical processes, key constraints, and scale-up potential. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 12, 471-494.
- De Simone, S. and Krevor, S., 2021. A tool for first order estimates and optimisation of dynamic storage resource capacity in saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 106, 103258.
- Nordbotten, J.M., Celia, M.A. and Bachu, S., 2005. Injection and storage of CO₂ in deep saline aquifers: Analytical solution

for CO₂ plume evolution during injection. *Transport in Porous Media*, 58, 339-360.

Buckley, S.E. and Leverett, M.C., 1942. Mechanism of fluid displacement in sands. *Transactions of the AIME*, 146, 107-116.

Peng, D.Y. and Robinson, D.B., 1976. A new two-constant equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15, 59-64.

Henry, W., 1803. Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures and under different pressures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 93, 29-274.

Furre, A.K., Eiken, O., Alnes, H., Vevatne, J.N. and Kiær, A.F., 2017. 20 years of monitoring CO₂ injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 114, 3916-3926.

대염수층에서의 습윤 이산화탄소 주입을 통한 암염 침전 완화 실험

류한나¹⁾, 임현중²⁾, 박상건¹⁾, 권형민¹⁾, 안태웅³⁾, 정훈영^{4)*}

Experimental Study on the Mitigation of Salt Precipitation via Wet CO₂ Injection in Deep Saline Aquifers

Hanna Ryu¹⁾, Hyunjoong Lim²⁾, Sangkeon Park¹⁾, Hyeongmin Kwon¹⁾, Taewoong Ahn³⁾ and Hoonyoung Jeong^{4)*}

초 록

CCS 프로젝트는 수송 과정에서 배관의 부식을 방지하기 위해 Dry CO₂ 상태로 수송하여 저장한다. 그러나 Dry CO₂를 대염수층에 주입할 경우 주입정 근처에서 염수가 증발하며 암염이 침전될 수 있다. 이는 공극 막힘 및 유체 투과율 감소를 초래하여 CO₂ 지층 저장 주입성을 저하시킨다.

본 연구는 암염 침전을 완화하기 위해 Dry CO₂ 대신 Wet CO₂를 주입하는 방법을 제안한다. 코어유동 실험을 통해 20wt% 염수 조건에서 사암 시료에 Dry CO₂와 Wet CO₂를 주입한 후, 각각의 공극률과 절대 유체투과율을 측정하였다. Wet CO₂ 주입 시에는 Dry CO₂ 대비 공극률 및 절대 유체투과율 감소가 각각 62.5%, 49.51% 완화되었으며, 이는 Wet CO₂가 염수 증발을 억제하여 암염 침전을 방지함으로써 CO₂의 유동성이 안정적으로 유지됨을 실험적으로 입증한다.

주요어: 이산화탄소 지층 저장, 대염수층, 암염 침전, Wet CO₂

서 론

지구온난화가 가속화되면서 탄소 포집 및 지층저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술은 핵심적인 역할을 하고 있다. 대염수층은 다양한 지역에 광범위하게 분포해 발견이 용이하며 다른 저류층에 비해 저장 용량이 크다는 장점이 있으나, 암염 침전 문제가 발생할 수 있다. 일반적으로 이산화탄소 수송 시 파이프라인 부식을 예방하기 위해 수송 전에 탈수시켜 Dry CO₂를 사용한다. 하지만 대염수층에 Dry CO₂를 주입할 경우, 주입정 근처에서 물이 증발하여 용해도가 최대값 이상으로 증가하면 암염 침전 발생한다. 암염 침전은 공극 막힘 및 유체 투과율 감소를 초래하며, CO₂ 주입 시 과도한 압력 상승 때문에 CO₂ 지층 저장 주입성을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대염수층에 수분을 포함한 Wet CO₂를 주입하여 암염 침전 문제를 완화하는 방법을 제안하고, 실험을 통해 완화 효과를 정량적으로 입증하고자 한다.

본 론

본 실험은 Berea 사암 시료(지름 2.45 cm, 길이 4.5 cm)를 대상으로 수행되었다. 20 wt% NaCl 염수를 사용하여 대염수층의 고염도 환경을 조성하였으며, 온도는 40°C, 압력은 초임계 상태인 1,150 psi로 유지하였다. 구속 압력은 시료 압력보다 500 psi 높게 유지하였으며, CO₂ 유량은 선행 연구의 실험 조건을 참고하여 1 cc/min으로 설정하였다(Grude et al. 2014). Wet CO₂는 시린지 펌프 내부에 증류수를 채우고 상부 공간에 CO₂를 포집하여 제조하였다. 실험 시스템은 Figure 1과 같이 유체 주입 펌프, 일정 온도를 유지하는 Heat Chamber, 코어 홀더 및 배압 조절기(BPR)로 구성하였으며, Figure 2의 순서에 따라 실험을 진행하였다. 측정의 신뢰도를 위해 Klinkenberg 효과를 반영한 가스 유체투과율 측정을 실시하였으며, 실험 단계마다 시료의 무게, 공극률, 유체투과율을 반복 측정하였다. 특히 암염 침전 시료의 절대 유체투과율을 정확히 산출하기 위해, 3 wt% 염수로 포화된 시료의 상대 유체투과율(0.5215)을 기준으로 활용하여 환산하였다.

*Corresponding Author : hoonyoung.jeong@snu.ac.kr

1) 서울대학교 에너지시스템공학부

2) 포스코인터내셔널

3) 한국지질자원연구원 석유에너지연구센터 센터장

4) 서울대학교 에너지자원공학과 교수

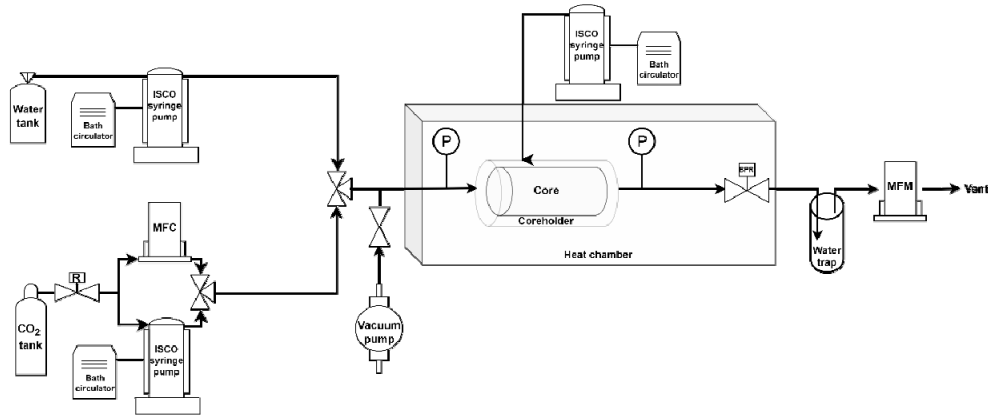


Figure 1. 코어유동실험 시스템 설계 모식도

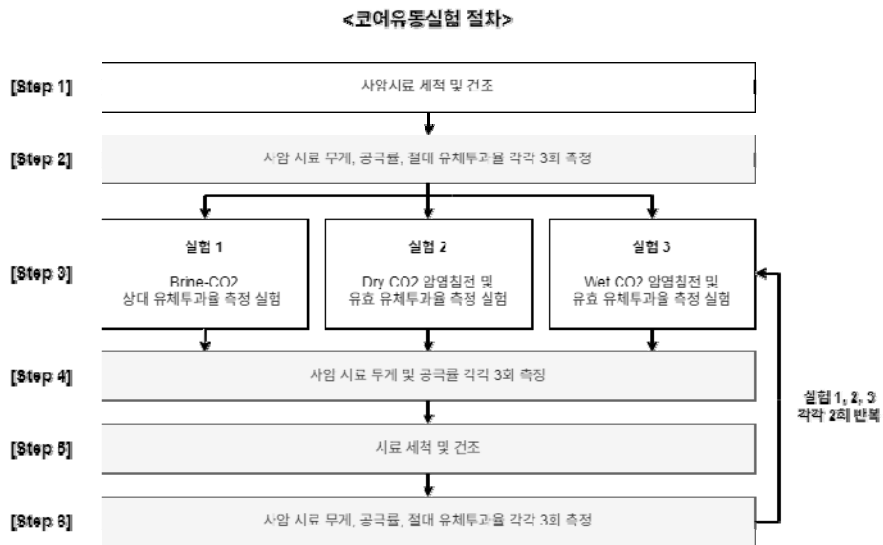


Figure 2. 코어유동실험 시스템

Dry CO₂ 주입 시 절대 유체투과율은 사암 시료 대비 30.16% 감소하였으나, Wet CO₂ 주입 시에는 15.23% 감소에 그쳤다. 이는 Dry CO₂ 대비 49.51%의 유체투과율 감소 완화 효과가 있음을 보여준다. 암염 침전으로 인한 공극률 감소량 역시 Dry CO₂ 조건(0.96%)보다 Wet CO₂ 조건(0.36%)에서 현저히 낮았으며, 약 62.5%의 개선을 확인하였다. 생성된 암염의 무게를 측정된 결과, Dry 조건(0.56 g) 대비 Wet 조건(0.175 g)에서 68.75% 적게 생성되었음을 입증하였다. 실제 시료 표면 관찰에서도 Dry CO₂는 주입면에 뚜렷한 암염 결정이 형성된 반면, Wet CO₂는 육안상 유의미한 침전이 발견되지 않았다.

	절대 유체투과율		공극률		암염 무게	
	평균 결과값 (md)	사암시료 대비 증감률(%)	평균 결과값 (%)	사암시료 대비 증감률(%)	평균 결과값 (g)	사암시료 대비 증감률(g)
사암 시료	388.46	-	22.08	-	0	-
Dry CO ₂	271.3	30.16	21.12	4.35	0.56	0.56
Wet CO ₂	329.31	15.23	21.72	1.63	0.175	0.175

결론

본 연구를 통해 대염수층 내 CO₂ 지중저장 시 발생하는 암염 침전 문제에 대해 Wet CO₂ 주입이 효과적인 선제적 대응책이 될 수 있음을 확인하였다. Wet CO₂는 Dry CO₂ 대비 유체투과율과 공극률 감소를 각각 49.51%, 62.5%로 개선함으로써, CCS 운영의 경제성과 안정성을 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 실험 중 주입 라인의 대기 노출로 인해 증기 포화도가 100%에 도달하지 못하여 미세한 침전이 발생한 점은 한계로 남는다. 향후 연구에서는 실제 지층수와 유사한 다 성분 염수를 적용한 실험과 현장 스케일의 시뮬레이션을 통해 Wet CO₂ 주입 기술의 현장 적용성을 더욱 정교하게 검증할 필요가 있다.

사사

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발사업의 지원을 받아, 탄소중립 기술DB 기반 온실가스 감축량 평가 연구단이 수행한 결과물입니다.(과제번호 RS-2025-02213131)

이 논문은 2025년도 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-16063236, CCS 통합 시스템 네트워크 최적화 및 안전성 확보 기술 개발)

References

- Bacci, G., Korre, A. and Durucan, S., 2011. Experimental investigation into salt precipitation during CO₂ injection in saline aquifers. *Energy Procedia*, 4, 4450-4456.
- Jeddizahed, J. and Rostami, B., 2016. Experimental investigation of injectivity alteration due to salt precipitation during CO₂ sequestration in saline aquifers. *Advances in Water Resources*, 96, 23-33.
- Grude, S., Landrø, M., & Dvorkin, J. (2014). Pressure effects caused by CO₂ injection in the Tubåen Fm., the Snøhvit field. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.05.013>

2026 한국석유공학회 춘계학술대회 초록집 인용 안내

본 초록집에 수록된 논문을 인용하는 경우 다음과 같이
출처를 밝혀 주시기 바랍니다.

*인용 예 : 저자, 출판년도, 제목, 논문집명, 주관단체명, 개최장소,
인용쪽 순으로 표기하고 논문집명은 기울임체로 표기

(Hong, K.D. and Lee, Y.H., 2026. Study on resource engineering curriculum.
*Proc. of 2026 the 5th Spring Conference of KSPE, The Korean Society of
Petroleum Engineers, Oakwood Premier, Incheon, p.1-2*)



석유·가스 산업의 미래
SI 전환과 도전