

3차원 탄성파 자료와 지구통계 앙상블 모델링을 이용한 서해 이산화탄소 저장소 암상·공극률 모델 및 불확실성 평가

조상인¹ · 김현민² · 박은실¹ · 김좌겸³ · 조홍근¹ · 변중무³ · 편석준^{1*}

¹인하대학교 에너지자원공학과

²삼성중공업 해양엔지니어링

³한양대학교 자원환경공학과

Assessment of Facies and Porosity Uncertainty in a West Sea CO₂ Storage Reservoir Using 3D Seismic-Driven Geostatistical Ensemble Modeling Techniques

Sangin Cho¹, Hyunmin Kim², Eunsil Park¹, Jwagyum Kim³, Honggeun Jo¹, Joongmoo Byun³, and Sukjoon Pyun^{1*}

¹Department of Energy Resources Engineering, Inha University

²Offshore Engineering Team, Samsung Heavy Industries Co.

³Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

요약

이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)은 탄소중립 달성을 위한 핵심 기술 중 하나로, 화석연료 중심의 현 산업체계에서 발생하는 탄소배출을 구조적으로 저감하기 위한 전환 기술이다. 특히 이산화탄소 지중 저장은 대규모 탄소 감축을 실현하기 위한 필수적인 기술 요소로서, 저장소 물성의 공간적 분포와 이에 수반되는 불확실성에 대한 정량적 평가가 요구된다. 본 연구에서는 한반도 서해권역에서 취득된 3차원 탄성파 탐사 자료를 활용하여, 이산화탄소 저장 유망층으로 제안된 전기 마이오세 퇴적층(SU5)의 저장소 물성 분포와 불확실성을 평가하였다. 탄성파 자료로부터 도출한 음향임피던스(acoustic impedance)를 기반으로 암상 및 공극률의 공간 분포를 지구통계학적으로 모델링하였으며, 시추공 자료가 제한적인 조건을 고려하여 확률론적 접근을 적용하였다. 또한 주요 지구통계 인자의 변동성을 반영한 모델 앙상블 구축을 통해 저장소 물성의 공간적 변동 특성을 분석하고, 이를 통해 단일 결정론적 모델보다 신뢰성 있는 저장소 물성 모델을 도출하고자 하였다.

주요어: 이산화탄소 지중저장, 지구통계 모델링, 서해 군산 분지, 3차원 음향 임피던스, 불확실성 정량화

ABSTRACT

Carbon capture and storage (CCS) is one of the key technologies for achieving carbon neutrality. It serves as a transitional strategy to systematically reduce carbon emissions from the existing fossil fuel-based industrial system. In particular, the geological storage of carbon dioxide constitutes a critical component for achieving large-scale carbon reduction; this requires a quantitative evaluation of the spatial distribution of reservoir properties and their inherent uncertainties. In this study, we evaluated the distribution and associated uncertainty of reservoir properties within the Early Miocene stratigraphic unit SU5, a proposed prospective CO₂ storage formation, using three-dimensional seismic data acquired from the western offshore region of the Korean Peninsula. Acoustic impedance derived from seismic data was utilized to construct geostatistical models of the spatial distribution of rock facies and porosity, and a probabilistic framework was implemented to account for the limited availability of well data. In addition, an ensemble of models incorporating variations in key geostatistical parameters was generated to evaluate the spatial variability of reservoir properties. This approach aimed to derive more robust and reliable reservoir property models than those obtained using a single deterministic approach.

KEYWORDS: CCS, Geostatistical Modeling, Gunsan Basin, 3D Acoustic Impedance, Uncertainty Quantification

*Corresponding author

E-mail: pyunsj@inha.ac.kr

Address: Department of Energy Resources Engineering, Inha University, 100 Inharo, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

Received: 12 January 2026; **Revised:** 12 February 2026; **Accepted:** 23 February 2026

© 2026 Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

이산화탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)은 2050년 탄소중립 달성을 위한 핵심적인 감축 기술 중 하나이다. 대한민국 정부 역시 2020년 2050 탄소중립 선언 이후 마련한 정책 로드맵에서 CCS를 주요 탄소 감축 수단으로 명시하고 있으며, 중·장기적으로 대규모 저장소 확보를 통한 안정적인 CO₂ 처리 능력 확보를 목표로 하고 있다.

2050 탄소중립 시나리오에 따르면, 국내외 해양 지층 등을 활용하여 CCS를 통해 연간 최대 6,000만 톤의 CO₂ 저장이 필요하며, 이 가운데 국내 저장 목표는 연간 약 3,000만 톤으로 설정되어 있다(Republic of Korea, 2021). 현재 평가된 국내 주요 유망 저장소의 총 저장용량은 약 7.3억 톤으로, 이는 연간 2,400만톤의 CO₂를 약 30년간 저장할 수 있는 규모에 해당한다. 따라서 현 수준의 저장 용량만으로는 국내 저장 목표를 충족하기에는 다소 부족한 상황이다. 그러나 2단계 잠재 지층 중 유망 구조 수준의 저장소 약 2억 톤을 추가로 확보할 경우, 총 저장용량은 약 9.3억 톤(연간 약 3,100만 톤)까지 확대될 수 있다. 나아가 저장 효율 향상 기술이 개발·적용될 경우, 최대 11.6억 톤(연간 약 3,870만 톤) 규모의 CO₂ 저장이 가능할 것으로 제시되고 있다(MOTIE and MOF, 2021).

따라서 국내 저장 목표 달성을 위해서는 추가적인 탐사를 통한 유망 구조 발굴 및 저장 효율 향상 기술 개발이 필수적이다. 이에 따라 한 반도 인접 해역을 대상으로 한 추가 저장소 후보 구조의 발굴과 저장 잠재량에 대한 정량적 평가가 요구된다. 서해 해역은 시추 및 3차원 탄성파 자료의 가용성이 상대적으로 제한적이므로, 저장소 후보 구조를 추가로 발굴하기 위한 탐사·해석 연구가 필요하다.

이산화탄소 저장소 유망 구조의 도출은 탄성파 탐사 자료에 대한 정밀한 해석과 시추 자료를 포함한 탐사 자료의 종합적인 검토를 통해 수행되어 왔다(Kim *et al.*, 2012; Shinn *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2017). 또한 사업성 평가를 위해 산정되는 저장 용량은 실제 이산화탄소가 주입·저장되는 저류층과 구조를 한정하여 정의된 유망 구조를 대상으로 평가된다(Kwon and Shinn, 2018).

저장 용량은 저장층의 공극률 분포와 주입 과정에서 허용 가능한 뿔개암의 한계 공극압에 의해 결정되므로, 저류층 물성의 공간적 분포를 신뢰성 있게 예측하는 것이 핵심적이다. 탄성파 정량 해석을 통해 도출된 지구물리학적 물성은 지구통계 기법과 결합함으로써 이산화탄소 저장층의 공극률 분포 예측에 활용될 수 있다. 그러나 이러한 모델링 과정에는 입력 자료 및 모델 파라미터에 따른 불확실성이 내재하므로, 저장 용량 평가에서는 해석 결과의 불확실성을 고려한 접근이 필요하다.

이 연구에서는 서해 권역에서 취득된 3차원 탄성파 탐사 자료를 이용하여 저류층 물성 모델링을 수행하고, 암상 및 공극률 모델을 구축하고자 한다. 연구 대상 지역에서는 대상 저류층을 직접 대표하는 물리검층 자료의 확보가 제한적이므로, 인접 지역 시추공에서 취득된 검층자료를 보완적으로 활용하였다. 이에 따라 지구통계학적 모델링에 필요한 핵심 파라미터의 추정 불확실성을 반영한 정량적 평가를 수행하여 저장소 물성 모델링 결과의 신뢰성을 검토하고자 한다.

이론

지구통계 기반 암상 및 공극률 모델링

유망 저장소의 암상(rock facies)과 공극률(porosity)에 대한 3차원 공간 분포의 지구통계학적 모델링은 3차원 탄성파 자료로부터 수행한 층서 해석 결과와 음향임피던스(acoustic impedance) 역산 결과를 기반으로 한다. 층서 해석 결과는 퇴적체의 구조적 형상을 반영한 층서 좌표계(stratigraphic grid) 구축에 활용되며, 모든 시뮬레이션은 퇴적 좌표계(depositional grid)에서 수행한 후 최종적으로 층서 좌표계로 복원한다(Pyrcz and Deutsch, 2014). Fig. 1은 저장소 모델링 영역 내 음향임피던스를 층서 좌표계(Fig. 1(a)) 및 퇴적 좌표계(Fig. 1(b))로 시각화한 결과이다. 음향임피던스는 암상 및 공극률 모델링에서 트레이닝 이미지(training image, TI) 및 2차 자료(soft data)로 활용된다(Choe, 2007; Pyrcz and Deutsch, 2014).

암상 모델링에는 다점지구통계(Multi-Point Statistics, MPS) 방법을 사용할 수 있다. MPS는 퇴적체 내 암상 패턴과 비정규적 공간 구조(예: 채널, 렌즈형 사암체 등)를 재현하기 위해 TI를 사용한다. 이 연구에서는 음향임피던스 역산 결과에 문턱값(threshold)을 적용하여 저 임피던스 영역을 사암, 고 임피던스 영역을 셰일로 변환한 이진화 이미지를 생성하고 이를 TI로 활용하였다. 시뮬레이션 과정에서 TI는 탐색트리(search tree) 형태로 표현되어 전역적인 암상 패턴을 규정한다. 동시에 음향임피던스를 2차 자료로 활용하여, MPS 탐색트리로부터 계산된 암상 확률과 음향임피던스로부터 유도된 조건부 확률의 곱 형태로 나타나는 확률 결합 모형인 τ 모델(tau model)에 따라 최종 암상을 결정한다(Strebel, 2002; Pyrcz and Deutsch, 2014). 이러한 방식으로 탄성파 기반 물성 정보와 퇴적 패턴을 동시에 반영한 암상 모델을 생성할 수 있으며, 전체 과정은 Fig. 2(a)에 요약되어 있다.

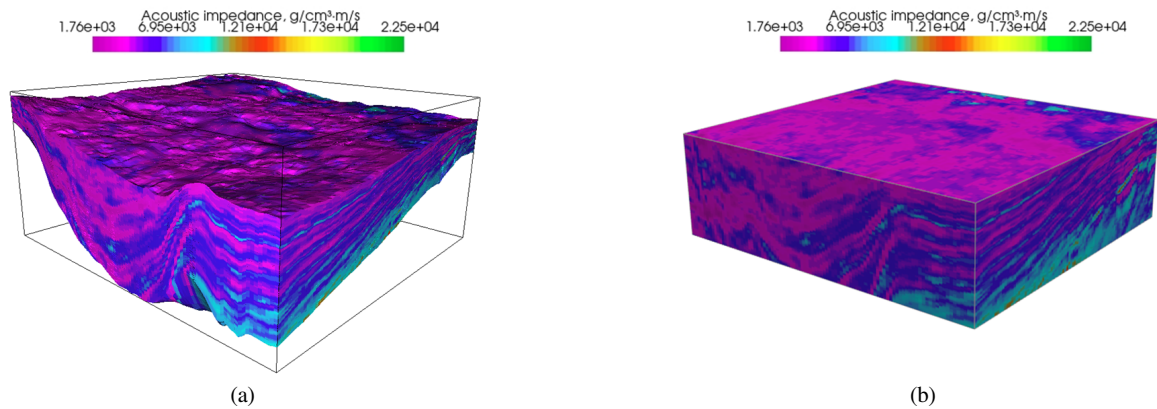


Fig. 1. Comparison of the acoustic impedance distribution within the defined region of interest (ROI), as modeled using (a) the stratigraphic grid system and (b) the depositional grid system.

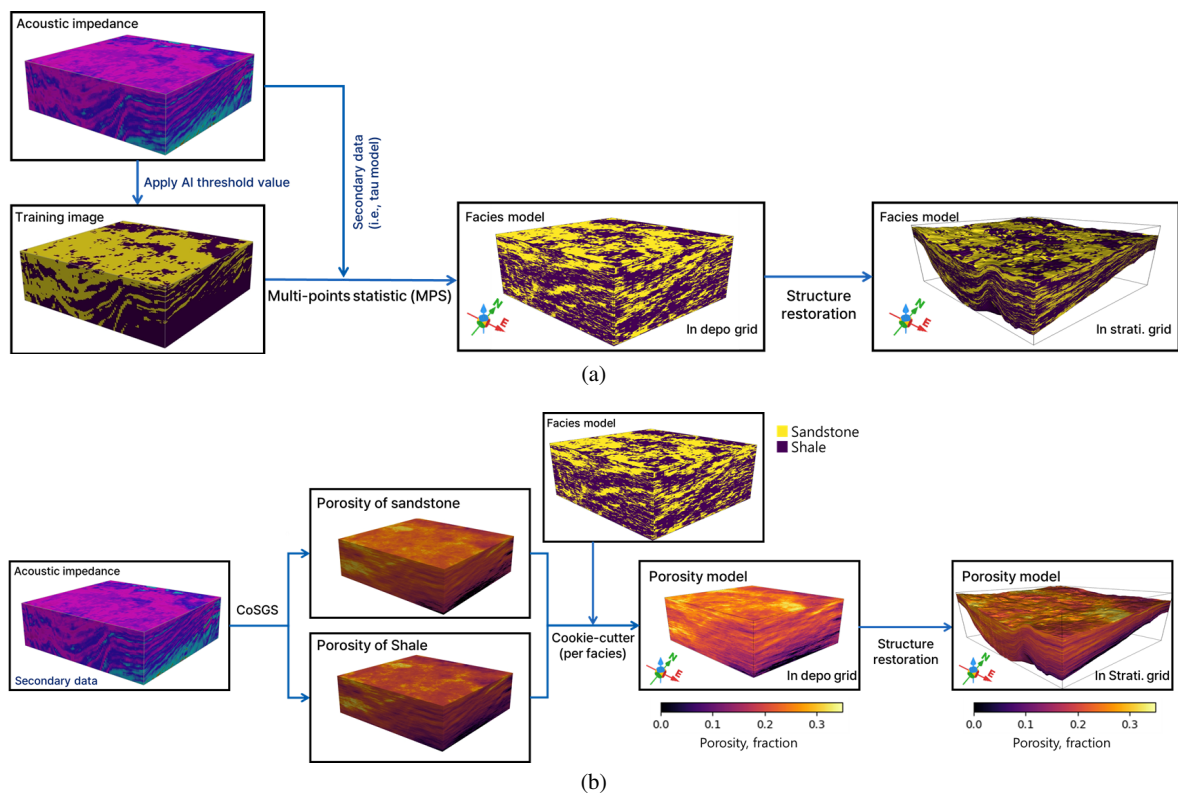


Fig. 2. Geostatistical modeling framework for (a) facies and (b) porosity. Acoustic impedance is employed as secondary soft data for both attributes. Facies are modeled using multi-point statistics (MPS), whereas porosity is simulated using collocated cokriging-based sequential Gaussian simulation (Co-SGS). The modeling is performed within the depositional grid system and subsequently transformed into the stratigraphic grid to achieve the final structural representation.

암상 모델링 이후 각 암상별 공극률 분포는 순차 가우시안 시뮬레이션(Sequential Gaussian Simulation, SGS)기반의 co-located cokriging 결합 기법(Co-SGS)을 적용하여 모델링하였다(Pyrz and Deutsch, 2014). 먼저 사암과 셰일 각각에 대해 공극률의 공간 연속성을 나타내는 베리오그램을 정의하였다. 일반 SGS가 kriging 평균과 분산으로 정의되는 정규분포에서 몬테카를로 샘플링을 수행하는 것과 달리, Co-SGS는 현재 위치의 음향임피던스 값을 공변량으로 포함시켜 공극률의 조건부 평균과 분산이 2차 자료와의 상관성을 반영하도록 한다. 사암과 셰일에 대해 각각 공극률 모델을 생성한 후, 앞서 구축한 암상 모델을 마스크로 사용하는 cookie-cutter 기법을 적용하여 사암 영역에는 사암 공극률을, 셰일 영역에는 셰일 공극률을 할당함으로써 최종 3차원 공극률 모델을 구축하였다(Choe, 2007). 전체 공극률 모델링 흐름은 Fig. 2(b)에 제시하였다.

현재 연구 대상 탐사지역 내에는 시추공 자료가 매우 제한적이며, 이용 가능한 인근 시추공들 역시 1988-1991년에 취득된 자료로서 본 연구의 관심 영역으로부터 50 km 이상 떨어져 있다(Shinn *et al.*, 2020). 이로 인해 MPS 및 Co-SGS에 사용되는 암상 비율, 베리오그램, 그리고 음향임피던스-공극률 간 상관계수와 같은 지구통계인자에 상당한 불확실성이 존재한다. 이러한 한계를 고려하여 이 연구에서는 단일 결정론적 통계치를 이용한 모델링을 발전시켜, 각 지구통계인자의 불확실 범위를 정의한 후 해당 범위 내에서 값을 무작위로 샘플링하여 암상 및 공극률 모델을 반복적으로 생성하였다.

이를 통해 총 100개의 지구통계 모델링 결과(realizations)로 구성된 모델 앙상블(ensemble)을 구축하고, 저장소 물성의 불확실성을 확률적으로 정량화하였다. 주요 불확실 지구통계인자는 (1) 사암과 (2) 셰일의 음향임피던스-공극률 상관계수, (3) 사암 비율, (4) 수평 및 (5) 수직 베리오그램 최대 상관거리(range)로 정의하였으며, Fig. 3은 이러한 앙상블 구축 절차를 요약한다.

3차원 탄성파 탐사 자료 취득 및 음향임피던스 역산 이후부터 지구통계 기반 저장소 모델링에 이르는 전체 절차는 Fig. 4에 개략적으로 정리하였다. Fig. 4에서 파란색 흐름선은 층서 해석 결과와 음향임피던스 자료가 모델링 입력자료로 어떻게 활용되는지를 나타내며, 주황색 영역은 MPS 및 Co-SGS를 이용한 암상과 공극률 모델링 단계를 의미한다. 이때 모든 지구통계 시뮬레이션은 퇴적 좌표계에서 수행되며, 모델링 완료 후 보라색 흐름선을 따라 층서 좌표계로 복원된다. 마지막으로, 불확실성을 고려하여 구축된 모델 앙상블로부터 관심 영역에 대해 P10, P50, P90 확률 모델을 도출하고, 이를 기반으로 저장소 물성의 범위와 대표성을 평가하였다.

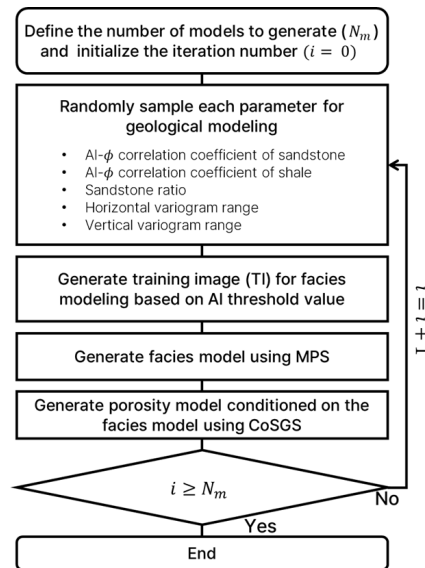


Fig. 3. Workflow for ensemble-based uncertainty assessment. The geostatistical modeling process is iteratively executed using varying parameter sets to generate an ensemble comprising 100 realizations.

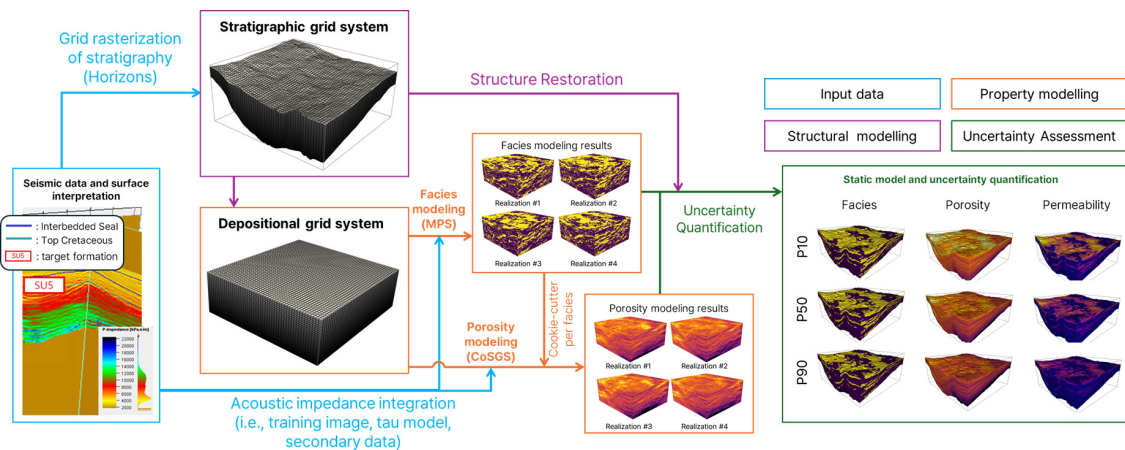


Fig. 4. Integrated geostatistical workflow for the characterization of rock facies and porosity, incorporating seismic-derived constraints and ensemble-based uncertainty quantification.

현장자료 적용

3차원 탄성파 자료 및 층서 해석

이 연구에서는 서해 군산분지 일대에서 취득된 3차원 탄성파 탐사 자료를 활용하였다. 해당 자료는 2024년 한국지질자원연구원이 탐해 3호를 이용하여 약 29 km × 10 km 영역을 대상으로 취득한 것이다(Lee *et al.*, 2025). 군산분지 내 동소분지 일대는 음향기반암 상부의 퇴적층을 총 6개의 탄성파 단위(SU1-SU6)로 구분하는 층서 체계로 해석되었다(Kim *et al.*, 2026).

이 중 전기 마이오세에 해당하는 탄성파 단위 SU5 (Fig. 5(a))는 약 800 m 이상의 심도에 분포하여 이산화탄소가 초임계 상태로 존재할 수 있는 압력·온도 조건을 만족하며, 사암 우세 저류층(sandstone-abundant reservoir)과 차폐층(seal) 구조가 발달하여 CO₂ 저장에 필요한 지질학적 조건을 충족하는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 2026). 따라서 해당 단위를 CO₂ 저장층으로서 높은 잠재성을 지닌 주요 분석 대상으로 설정하였다(Fig. 6). 또한 SU5 상부에는 이암(mudstone)과 셰일(shale)로 구성된 차폐층이 연속적으로 발달하며, CRS (Containment, Robustness, and Storage) 기반 저장 적합성 평가에서도 단층에 의한 누출 위험도가 낮은 것으로 평가되어(Kim *et al.*, 2026), Fig. 6에 나타난 단층 구조는 저장 안정성을 저해하지 않는 차단 단층(sealing fault)으로 해석하였다.

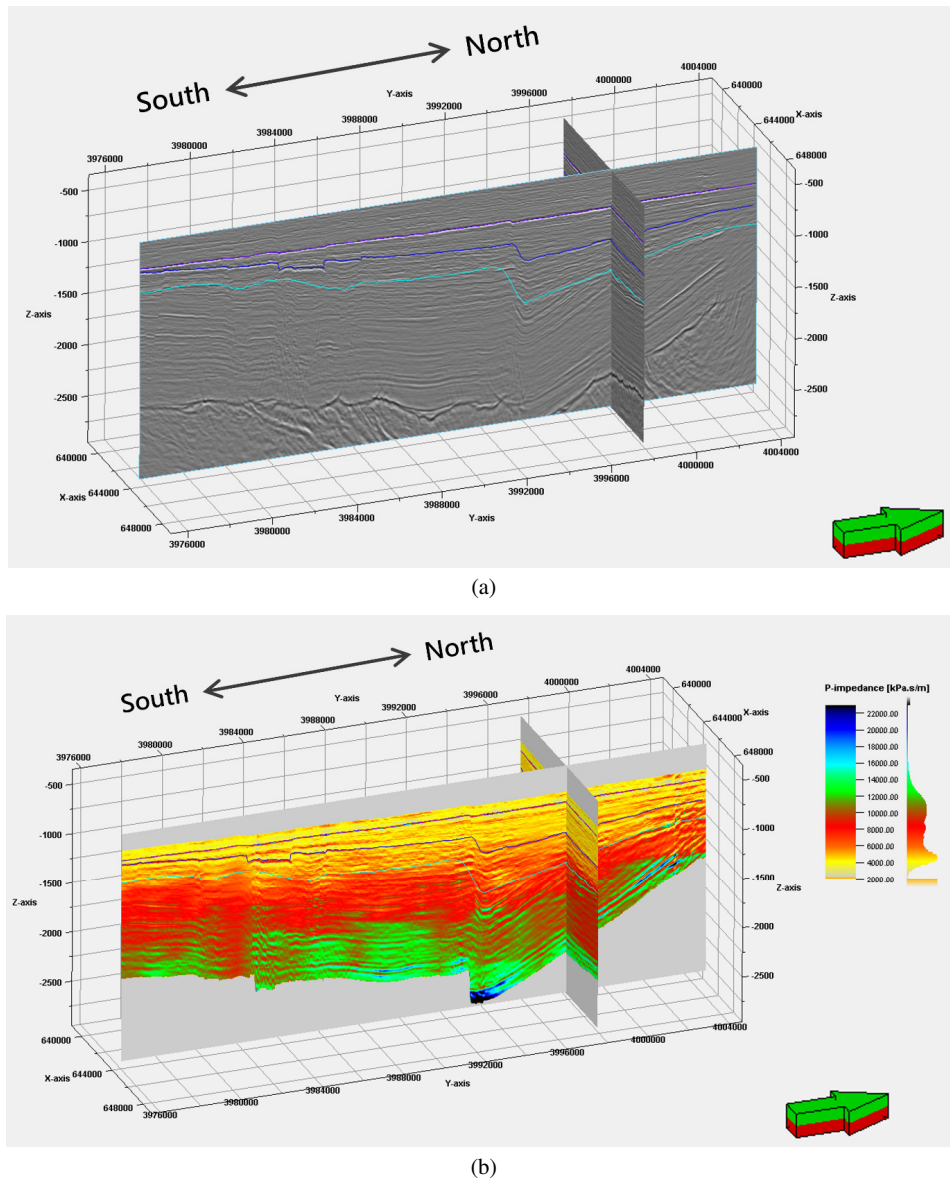


Fig. 5. Seismic sections acquired from the Gunsan Basin study area: (a) the interpreted seismic horizons and (b) the corresponding acoustic impedance inversion results derived from seismic inversion.

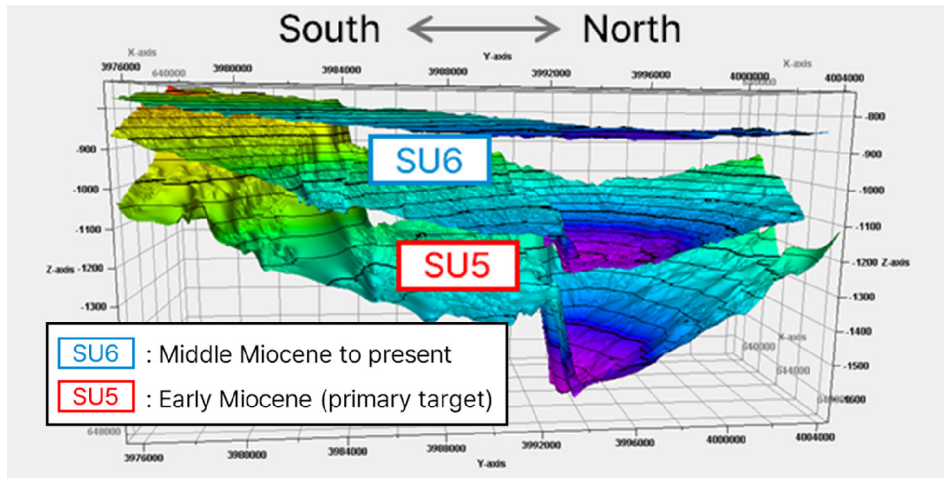


Fig. 6. Seismic stratigraphic interpretation depicting the key horizons and the stratigraphic units SU6 and SU5 within the study interval. Stratigraphic unit SU5 is identified as the primary CO₂ storage target formation on its inferred relatively porosity values.

음향임피던스 역산

일반적으로 음향임피던스는 탄성파 반사 자료에 대한 역산을 통해 추정되며, 널리 사용되는 모델 기반 음향임피던스 역산 기법은 시추공 자료를 이용해 구축된 저주파수 모델(low-frequency model)을 필요로 한다. 그러나 해상 CCS 후보지와 같이 시추공 자료가 부재하거나 제한적인 경우에는 기존 시추공 기반 역산 기법의 적용에 한계가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 시추공 자료의 유무 및 활용 가능성에 따라 다양한 음향임피던스 추출 시나리오가 제시된 바 있다(Kim *et al.*, 2024).

이 연구에서는 시추공 자료가 존재하지 않는 조건을 가정하여 수행된 Kim *et al.* (2025)의 음향임피던스 역산 결과를 활용하였다(Fig. 5(b)). 3차원 탄성파 자료 처리 과정에서 산출된 구간 속도(interval velocity) 정보를 이용하여 밀도 값을 추정하고, 이를 기반으로 계산한 음향임피던스를 초기 모델로 설정하였다. 이후 선형계획법(linear programming) 기반 희소 스파이크 역산(sparse spike inversion) 기법을 적용하여 3차원 음향임피던스 볼륨을 도출하였으며, 이를 지구통계 기반 물성 모델링의 입력 자료로 활용하였다.

인근 시추공 Inga-1 통계 특성 분석

SU5 대상층은 시추공 자료가 존재하지 않는 구간이므로, 인접 유정들로부터 암상 비율, 베리오그램 및 암상-공극률 상관 관계를 추정하여 이를 암상 및 공극률 모델링에 적용하였다. Fig. 7은 3차원 탄성파 탐사 영역 인근에 위치한 Inga-1 시추공으로부터 도출한 암상 및 공극률 통계정보를 요약하여 보여준다. Fig. 7(a)는 탐사영역 및 Inga-1 시추공의 위치를 나타내며, 약 62 km 떨어진 것을 확인할 수 있다. Inga-1 시추공은 SU5를 확인할 수 있는 가장 인접한 시추공이므로 이를 활용하는 것이 타당하다(Shinn *et al.*, 2020). Fig. 7(b)는 Inga-1 시추공의 물리검층 자료(감마선(GR), 중성자(NPHI), 밀도(RHOB), 캘리퍼(CALI) 등)와 함께 SU5 지층에 해당하는 심도 구간을 제시한다. 이 연구에서는 Inga-1의 물리검층 자료 획득 구간 중 SU5 지층에 해당하는 전기 마이오세 구간만을 활용하여, 대상층과의 층서적 일관성을 유지하였다. 나아가 공극률과 음향임피던스 간의 신뢰도 높은 상관관계를 확보하기 위해, 캘리퍼 로그와 시추비트 사이즈 간 차이가 10% 이내인 구간만을 선별하여 물리검층 자료를 필터링하였다.

제한된 표본수로 인한 통계적 불확실성을 최소화하고 주요 암질 대비(사암-셰일)를 명확히 반영하기 위해 이분법적 암상 분류를 적용하였다. 시추공 물리검층 자료 내 암상분류를 위해 감마선 검층 자료를 이용해 셰일체적비(V_{sh})를 산정하였으며, 저감마선 사암 구간($GR_{min} = 40 APN$)과 고감마선 셰일 구간($GR_{max} = 120 APN$)을 기준으로 선형 정규화를 적용하였다. 계산된 V_{sh} 값은 0~1 범위로 제한하여 적용하였고, $V_{sh} = 50\%$ 를 기준으로 암상을 사암과 셰일로 구분하였다.

$$V_{sh} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (1)$$

Fig. 7(c)는 암상별 공극률-음향임피던스 관계를 나타내며, 사암과 셰일 모두에서 뚜렷한 음의 상관관계가 확인된다. 구체적으로 사암은

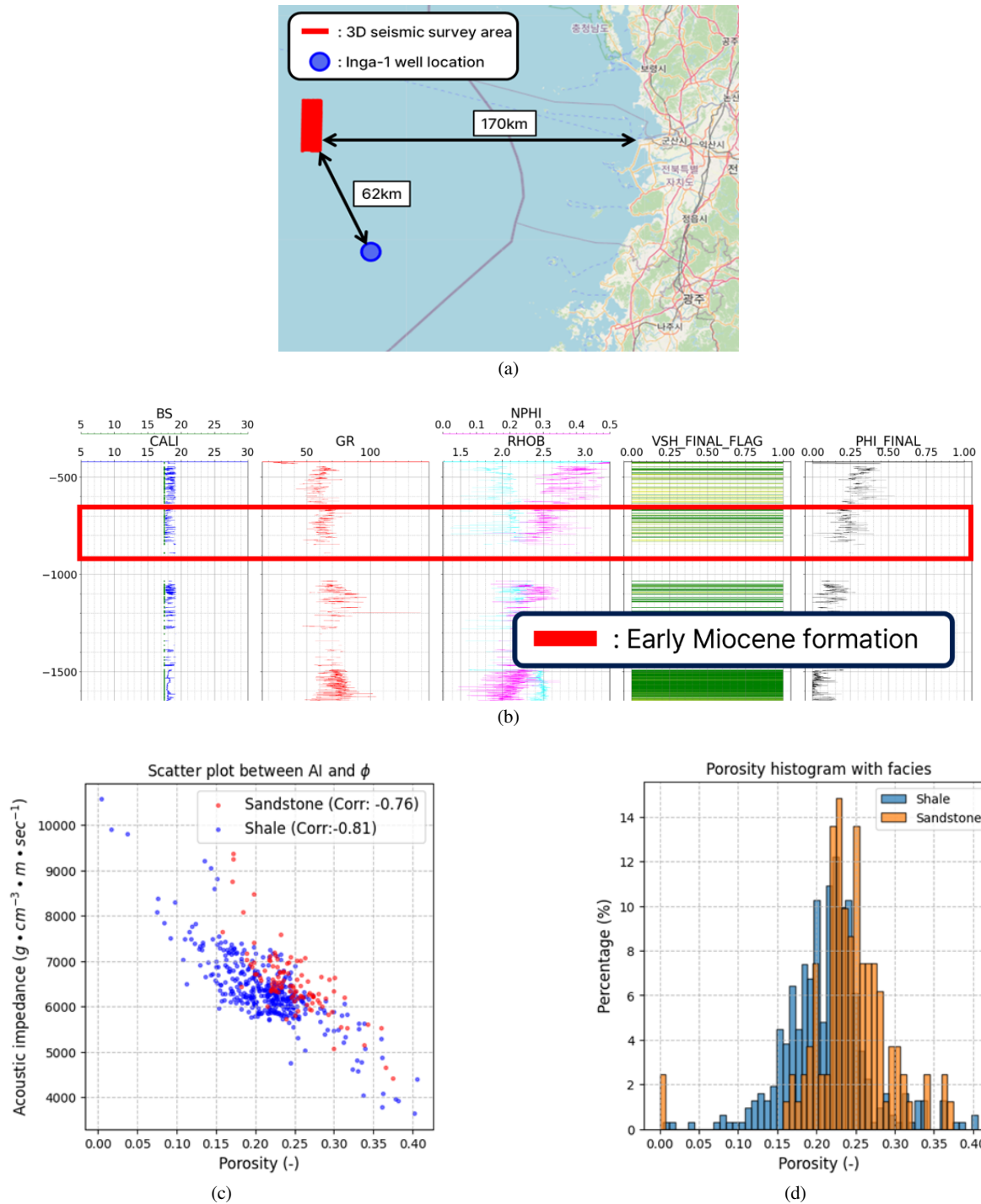


Fig. 7. Integrated well data analysis performed in proximity to the seismic survey area: (a) a location map illustrating the survey area and the Inga-1 well; (b) a suite of well logs, including gamma ray (GR), neutron porosity (NPHI), bulk density (RHOB), and caliper (CALI), with the depth interval corresponding to the SU5 (Early Miocene) formation clearly highlighted; (c) facies-dependent correlations between porosity and acoustic impedance; and (d) porosity distributions systematically classified according to facies. Rock facies are defined based on shale volume (Vsh), with Vsh > 50% classified as shale and Vsh < 50% classified as sandstone.

-0.76의 상관계수를, 셰일은 -0.81의 상관계수를 관측할 수 있다. Fig. 7(d)는 물리검층 자료 중 중성자 검층으로부터 산정한 공극률 분포를 암상별로 시각화한 결과이다. Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 밀도 검층 자료는 보어홀 조건 변화(CALI 변동)의 영향을 받아 잡음이 크게 나타나는 반면, 중성자 검층 자료는 비교적 연속적이고 안정적인 거동을 보였다. 이에 본 연구에서는 암상별 공극률 분포의 통계적 비교를 위해 중성자 검층 자료를 활용하였다. 그 결과 사암이 셰일에 비해 평균 공극률이 높고, 공극률 분산이 상대적으로 작게 나타남을 확인할 수 있다.

앞서 소개한 지구통계인자의 불확실성을 고려하기 위해 총 5개 인자들의 범위를 Table 1과 같이 설정하였다. 음향임피던스-공극률의 상관계수 및 사암 비율은 Fig. 7에 제시된 물리검층 자료를 대상으로 복원추출 기반의 통계적 불확실성 평가 기법인 부트스트래핑(bootstrapping)을 적용하여 도출하였다. 수평 방향의 베리오그램은 수평으로 분포한 시추공 자료가 충분하지 않아 직접적인 산정에 한계가 있으므로, 기존 연구에서 제시된 범위를 참고하여 경험적으로 수평 최대 상관거리 값을 설정하였다(Pyrz and Deutsch, 2014). 수직 방향 베리오그램은 물리검층 자료를 기반으로 설정 가능한 범위를 검토하여 도출하였다.

Table 1. Geostatistical parameters and their corresponding value ranges used in the stochastic modeling workflow.

Parameter	Minimum	Maximum
AI- ϕ correlation coefficient of sandstone	-0.805	-0.702
AI- ϕ correlation coefficient of shale	-0.835	-0.775
Sandstone ratio (%)	19.4	24.2
Horizontal variogram range (m)	4,000	6,000
Vertical variogram range (grids)	20	30

결 과

암상 및 공극률 모델링과 앙상블 생성 결과

모델링 영역은 탄성파 해석을 통해 규명된 두 개의 주요 단층면을 회피하도록 설정하여, 구조적 불연속성이 시뮬레이션에 미치는 영향을 최소화하였다. 이후 100 m × 100 m × 1-2 m 해상도의 셀로 구성된 퇴적 좌표계를 생성한 뒤, 암상 모델링과 공극률 모델링을 순차적으로 수행하였다.

암상은 음향임피던스로부터 생성한 TI를 기반으로 하여 MPS 모델링을 수행하였으며, 공극률은 암상별 베리오그램과 음향임피던스-공극률 상관관계를 반영한 Co-SGS를 이용해 모델링하였다. MPS 모델링에서는 일반적으로 활용되는 설정 값을 적용하였으며, 최대 탐색거리(maximum search radii)는 (10, 10, 5), 다중 격자 개수(number of multiple grids)는 5, 자료점 수(number of data points)는 30으로 설정하였다. 이 과정에서 Table 1에 정의된 암상별 음향임피던스-공극률 상관계수, 사암 비율, 그리고 수평·수직 베리오그램 최대상관거리를 불확실한 변수로 설정하고, 이들을 무작위로 샘플링하여 총 100개의 지구통계 결과를 생성하였다. Fig. 8은 이 중 일부 모델링 결과 5개를 제시하며, 입력 파라미터 변화에 따라 사암의 연결성, 채널 구조, 그리고 높은 공극률 영역의 공간 분포가 크게 달라질 수 있음을 보여준다.

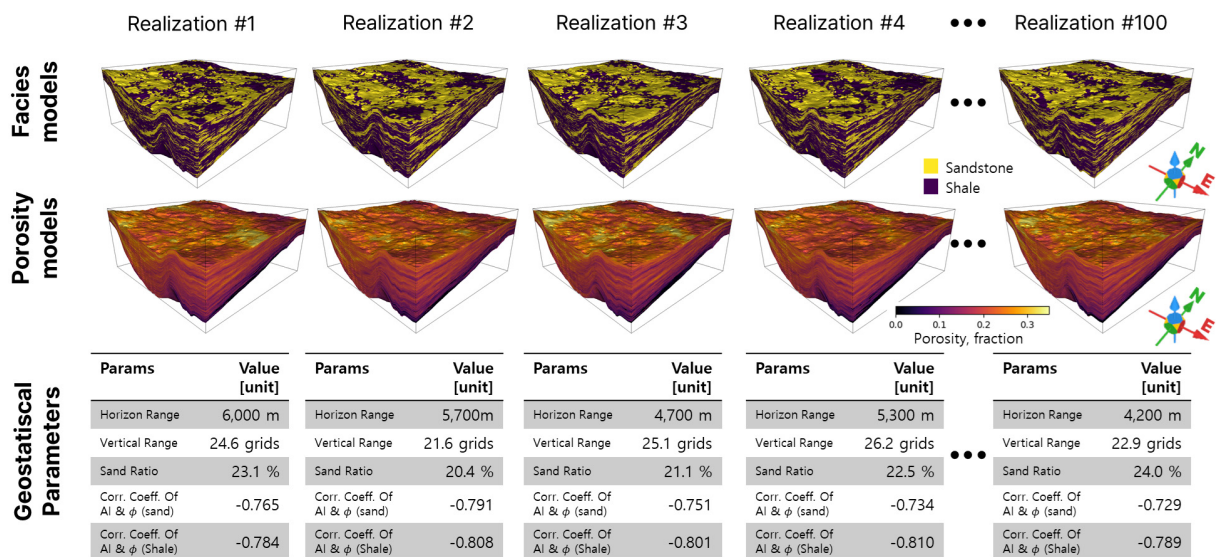


Fig. 8. Representative realizations of facies (top) and porosity (middle) models generated using varying geostatistical input parameters (bottom). Five representatives examples are presented from the ensemble comprising 100 realizations.

확률론적 저장소 모델 및 불확실성 평가

앙상블로부터 격자별 백분위(percentile)를 계산하여 암상과 공극률에 대한 P10, P50, P90 확률 모델을 도출하였다(Fig. 9). P50 모델은 가장 가능성이 높은 중간값 시나리오를, P10은 사암과 공극률이 상대적으로 크게 나타나는 낙관적 시나리오를, P90은 저품질 저장소를 가정한 보수적 시나리오를 각각 나타낸다. 동일한 탄성과 제약조건 하에서도 이러한 모델 간 차이는 저장소 구조와 품질의 불확실성이 상당함을 확인할 수 있다.

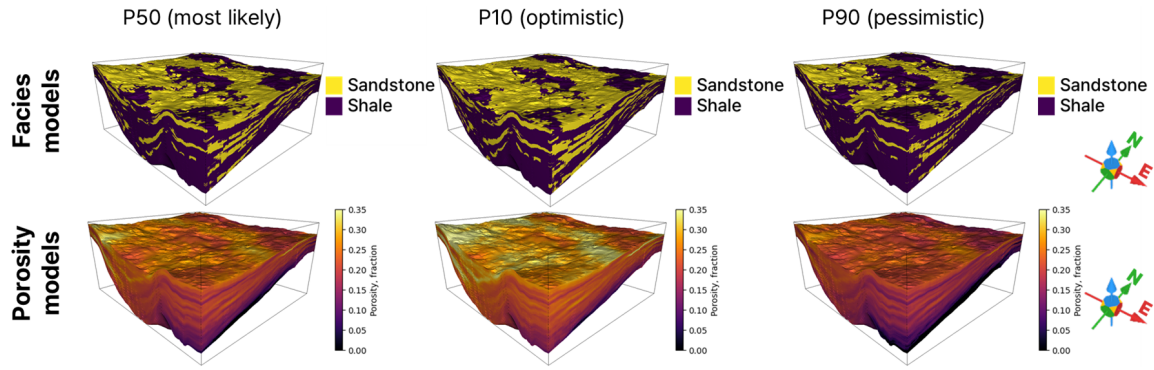


Fig. 9. Representative P10, P50, and P90 percentile models of facies distribution and porosity within the predefined volume of interest. These models were derived from cell-based percentile calculations performed across the ensemble comprising 100 realizations.

또한 Fig. 10은 관심 영역 내에서 계산된 사암 비율과 평균 공극률의 앙상블 분포를 나타낸다. 사암 비율과 공극률 평균 모두 의미 있는 변동 폭을 보이며, 이는 암상 비율, 공간 연속성, 그리고 물성-탄성과 상관관계에 대한 불확실성이 저장소 평가에 직접적으로 반영됨을 의미한다. 또한 앙상블 내 모든 모델의 사암 비율, 평균 공극률 및 평균 투과도를 시추공 기반 통계와 비교함으로써, 생성된 모델들이 지질학적으로 일관된 범위 내에 있음을 검증하였다. 이러한 앙상블 기반 확률 모델은 단일 결정론적 모델 대비 저장소 성능 및 불확실성을 정량적으로 평가할 수 있는 강점을 가진다.

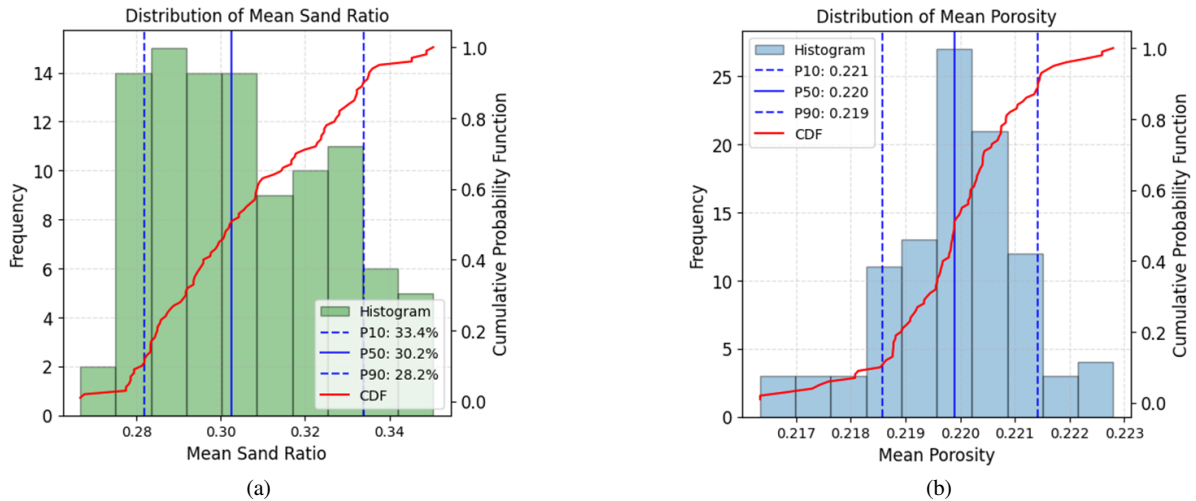


Fig. 10. Distribution of the expected (a) sandstone portion and (b) mean porosity within the defined volume of interest.

결론

한반도 서해 권역에서 취득된 3차원 탄성과 탐사 자료를 활용하여, 이산화탄소 저장 유망층인 전기 마이오세 퇴적층(SU5)에 대한 암상 및 공극률의 3차원 모델링을 수행하였다. 암상 모델링에는 MPS를 적용하여 퇴적체의 비정규적 공간 패턴을 반영하였으며, 공극률 모델링에는 음향임피던스-공극률 간 상관관계를 고려한 Co-SGS를 적용하였다. 또한 암상 비율, 베리오그램 최대 상관거리, 음향임피던스-공

극률 상관계수 등 주요 지구통계 인자의 불확실성을 고려하기 위해, 해당 인자들의 합리적인 범위를 설정하고 이를 무작위로 샘플링함으로써 총 100개의 모델로 구성된 지구통계 앙상블을 구축하였다.

구축된 앙상블 기반 저장소 물성 모델은 단일 결정론적 모델에 비해 저장소 특성의 공간적 변동성과 불확실성을 정량적으로 표현할 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 물성 앙상블은 향후 저장층의 유효 공극 부피, 사암 분포, 평균 공극률 등의 불확실성을 확률적으로 반영한 저장용량 평가로 자연스럽게 확장될 수 있으며, 단일 시나리오에 기반한 저장량 산정에서 발생할 수 있는 과대 또는 과소 평가 위험을 완화하는 데 기여할 수 있다. 특히 초기 탐사 단계에서 시추공 자료가 제한적인 조건하에서도, 탄성파 자료를 기반으로 구축된 확률론적 물성 모델을 활용함으로써 저장용량 평가의 신뢰성과 의사결정의 투명성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

제시된 3차원 탄성파 자료 기반 지구통계 저장소 모델링 워크플로우는 서해 권역을 대상으로 적용되었으나, 동일한 자료 조건이 확보될 경우 다른 해양 CCS 후보지에도 적용 가능성을 검토할 수 있는 기반을 제공한다. 특히 시추공 자료가 제한적인 초기 탐사 단계에서 저장소 물성의 공간 분포와 불확실성을 체계적으로 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다는 점에서, 향후 해양 권역별 CCS 저장소 평가 연구를 위한 중요한 참고 사례로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었으며(No. 20233D00000090), 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2025-25436989). 본 연구에 사용된 자료는 한국지질자원연구원으로부터 제공받았습니다. 아울러 본 연구 수행을 위해 SLB사로부터 Petrel 소프트웨어를 기증받아 활용하였으며, 이에 깊이 감사드립니다.

References

- Choe, J. G., 2007, *Geostatistics*, Sigma Press (in Korean).
- Choi, B. Y., Park, Y. C., Shinn, Y. J., Kim, K. Y., Chae, G. T., and Kim, J. C., 2015, Preliminary results of numerical simulation in a small-scale CO₂ injection pilot site: 1. Prediction of CO₂ plume migration, *J. Geol. Soc. Korea*, **51**, 487-496 (in Korean with English abstract).
- Kim, A. R., Kim, H. M., Kim, H. W., and Shinn, Y. J., 2017, Geomechanical stability analysis of potential site for domestic pilot CCS project, *Tunn. Undergr. Space*, **27**, 89-99 (in Korean with English abstract).
- Kim, D., Kim, J., Lee, G., Lee, J., and Byun, J., 2024, Development of process for extracting reservoir properties on CO₂ storage prospect from geophysical data in the West Sea Basin, *122nd Spring Conference of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Abstracts*, 65 (in Korean).
- Kim, J., Seol, S., and Byun, J., 2025, Acoustic impedance extraction from 3D seismic data for CO₂ storage assessment in Yellow Sea, *124th Spring Conference of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Abstracts*, 77 (in Korean).
- Kim, K., Kang, M., Cheong, S., Kim, K., Song, I., and Kim, K., 2026, Comprehensive site screening and selection for offshore CO₂ storage in the Early Miocene formations of the eastern Gunsan Basin, Yellow Sea, *Mar. Pet. Geol.*, **183**, 107621.
- Kim, Y., Lee, K., Jo, S., Kim, M., Kim, J. S., and Park, M. H., 2012, A preliminary evaluation on CO₂ storage capacity of the southwestern part of Ulleung Basin, offshore, East Sea, *Econ. Environ. Geol.*, **45**, 41-48 (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y. K. and Shinn, Y. J., 2018, Suggestion for technology development and commercialization strategy of CO₂ capture and storage in Korea, *Econ. Environ. Geol.*, **51**, 381-392 (in Korean with English abstract).
- Lee, G., Seo, S. J., Byun, J., Choi, Y., Kim, S., and Kang, M., 2025, Case study: Machine learning-based vertical resolution enhancement of seismic data in Gunsan Basin, West Sea, *2025 Fall Joint Conference of KSMER-KSAM-KSEG-KSCE, Abstracts*, 44 (in Korean).
- MOTIE and MOF, 2021, *Evaluation of Domestic CO₂ Storage Capacity for CCS: 730 Million Tons, Expandable to 1.16 Billion Tons*, Press Release, November 3, 2021. (in Korean)
- Park, J. Y., Kim, J. M., and Yoon, S. H., 2015, Three dimensional geologic modeling of the Pohang Basin in Korea for geologic storage of carbon dioxide, *J. Geol. Soc. Korea*, **51**, 289-302 (in Korean with English abstract).
- Pyrz, M. J. and Deutsch, C. V., 2014, *Geostatistical Reservoir Modeling*, Oxford University Press.
- Republic of Korea, 2021, *2050 Carbon Neutral Scenario*, 2050 Carbon Neutrality Commission, October 18, 2021 (in Korean).
- Shinn, Y. J., Lee, H. S., Lee, Y., Song, I., and Park, M. H., 2020, 3D grid based screening process for large-scale CO₂ geological storage in Gunsan

Basin, Yellow Sea, Korea, *Int. J. Greenh. Gas Control*, **99**, 103062.

Shinn, Y. J., Yoo, D. G., Hwang, S., Park, Y. C., and Huh, D. G., 2012, A preliminary screening of CO₂ geological storage in Ulleung Basin, Korea, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **49**, 47-58 (in Korean with English abstract).

Strebelle, S., 2002, Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics, *Math. Geol.*, **34**(1), 1-21.



조 상 인

2020년 인하대학교 에너지자원공학과 공학사
2022년 인하대학교 에너지자원공학과 공학석사
현재 인하대학교 에너지자원공학과 박사과정
E-mail: chosi@inha.edu



김 현 민

2023년 인하대학교 에너지자원공학과 공학사
2025년 인하대학교 에너지자원공학과 공학석사
현재 삼성중공업 해양엔지니어링팀 프로세스
엔지니어
E-mail: hm0210.kim@samsung.com



박 은 실

2024년 인하대학교 에너지자원공학과 공학사
현재 인하대학교 에너지자원공학과 석사과정
E-mail: eunssiri@inha.edu



김 좌 겸

2024년 한양대학교 자원환경공학과 공학사
현재 한양대학교 자원환경공학과 석사과정
E-mail: bear0208@hanyang.ac.kr



조 흥 근

2014년 서울대학교 에너지자원공학과 공학사
2016년 서울대학교 에너지시스템공학부 공학석사
2021년 The University of Texas at Austin
석유공학 공학박사
현재 인하대학교 에너지자원공학과 조교수
E-mail: honggeun.jo@inha.ac.kr



변 중 무

1991년 서울대학교 자원공학과 공학사
1993년 서울대학교 자원공학과 공학석사
2000년 University of California at Berkeley
응용지구물리학 공학박사
현재 한양대학교 자원환경공학과 교수
E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr



편 석 준

2002년 서울대학교 지구환경시스템공학과 공학사
2004년 서울대학교 지구환경시스템공학과 공학석사
2007년 서울대학교 대학원 협동과정 계산과학전공
공학박사
현재 인하대학교 에너지자원공학과 교수
E-mail: pyunsj@inha.ac.kr