

시추공이 부재한 CCS 후보지역에서의 중합전 임피던스 역산: 서해 군산분지 사례 연구

김좌겸 · 설순지 · 변중무*

한양대학교 자원환경공학과

A Prestack Impedance Inversion for CCS Candidate Site Without a Well: A Case Study of Gunsan Basin

Jwagyum Kim, Soon Jee Seol, and Joongmoo Byun*

Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

요약

이 연구에서는 CCS 후보지의 물성을 정량적으로 추정하고자 서해 군산분지에서 취득된 3D 탄성파 자료에 중합전 임피던스 역산을 적용하였다. 탐사지역 시추공 부재로 동일 분지의 원거리 시추공을 활용하였으며, 공벽 확장으로 왜곡된 밀도검층은 공경-밀도 관계 기반의 겹보기 거리계수로 보정하였다. 보정 자료를 기반으로 중합후 역산을 선행해 P파 임피던스를 추정하고 이를 저주파수 모델로 구축한 뒤, 중합전 역산을 단계적으로 수행하여 P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도 및 속도비(V_p/V_s)를 도출하였다. 그 결과 동일 층서 내 물성의 일관된 경향성과 암상 변화에 따른 속도비의 변화가 확인되었고, 단층-불연속면을 명확히 반영하여 지하 구조 해석 및 암상 분포 평가에 유효함을 보였다. 향후 이 연구에서 제시한 공정은 시추공이 부재한 저장후보지의 저장용량 산정과 주입정 위치 결정에 활용될 수 있다.

주요어: 이산화탄소 지중저장(CCS), 중합전 임피던스 역산, 3차원 탄성파자료, 밀도검층 자료 보정

ABSTRACT

In this study, we applied prestack impedance inversion to 3D seismic data from the Gunsan Basin, to quantify elastic properties for a potential CO₂ geological storage site. Because no wells exist in the survey area, low-frequency models for simultaneous inversion were built using logs from a distant well in the same basin. Density logs distorted by borehole washout were corrected using an apparent geometric factor derived from the caliper-density relationship. With the corrected logs, we first performed post-stack impedance inversion to estimate P-impedance and to construct a low-frequency model, and then conducted stepwise prestack inversion to obtain P-impedance, S-impedance, density, and V_p/V_s . The inverted properties show coherent trends within stratigraphic units and V_p/V_s variations linked to lithofacies changes. Prestack inversion results delineate faults and discontinuities clearly, supporting structural interpretation and facies assessment. In future, this workflow can be applied to estimate storage capacity and determine injection well locations in regions lacking wells.

KEYWORDS: Carbon Capture and Storage (CCS), Prestack Impedance Inversion, 3D Seismic Data, Correction of Density Log

서론

대한민국은 2050년 탄소중립 목표 달성을 위해 9억톤의 이산화탄소 감축이 필요하며, 이 중 6,000만톤의 이산화탄소를 포집하여 지중 저장 처리(Carbon Capture and Storage; CCS)해야 한다(PCCCR, 2021a). 이를 위해 2030년부터 매년 480만톤의 이산화탄소를 국내 저장소에 지중저장해야 한다. 현재 고갈된 동해가스전의 저장 목표가 매년 120만톤임을 감안하더라도 여전히 2030년부터 360만톤의 이산화탄소를 주입하기 위한 저장소가 필요하다(PCCCR, 2021b). 따라서 안정적인 탄소중립 이행을 위해서는 한반도 내에 상시 활용 가능한 저

*Corresponding author

E-mail: jbyun@hanyang.ac.kr

Address: Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Republic of Korea

Received: 22 December 2025; **Revised:** 16 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.

장소 부지를 하루빨리 확보하고, 이에 대한 실증적 평가와 상용화의 노력이 필요하다.

이를 위해 2024년 서해 군산분지에서 저장후보지에 대한 정확한 평가를 위해 3차원 정밀탐사가 수행되었고, 이를 기반으로 한 저장용량 예측이 이루어졌다. 이때 저장용량 예측과 덮개암의 안전성을 유지한 상태의 이산화탄소 주입을 위해서는 공극률, 공극압과 같은 지층저장소의 물성 정보가 필요하다. 이러한 물성 정보들은 탄성파 자료를 기반으로 임피던스 역산(impedance inversion)을 통해 도출한 P파 임피던스(P-impedance), S파 임피던스(S-impedance), 그리고 밀도를 통해 계산된다. 임피던스 역산의 정확도는 사용하는 입력자료의 품질에 크게 영향을 받으며, 일반적으로 탄성파 자료와 층서 해석 결과, 그리고 시추공 자료의 통합 활용이 요구된다. 특히 시추공 자료는 탄성파 자료로부터 얻을 수 없는 저주파수와 고주파수 정보를 포함하고 있으며, 그 중 저주파수 정보는 절대적인 물성값에 대한 정보를 제공하기 때문에 시추공 자료의 저주파수 성분을 이용하여 생성한 저주파수 모델(Low Frequency Model; LFM)을 역산의 초기값으로 사용한다.

군산분지 전체에는 기존의 석유 탐사를 위한 총 5개의 시추공이 존재하지만, 이 연구에서 사용한 3차원 탐사자료가 위치한 동소분지(east sub-basin) 북부에서는 시추공이 존재하지 않는다. 즉, 역산에서 LFM 구축에 직접 사용할 수 있는 시추공 자료가 존재하지 않는다. 다만, 탐사 영역에서 대략 62 km 떨어진 동소분지 남부 경계에서 취득된 잉어-1(Inga-1)공 자료가 같은 동소분지의 층서를 공유하고 있어 물성 정보를 간접적으로 제공할 수 있다(KIGAM, 2024).

시추공 자료를 사용할 때는 물리검층 자료가 정확하다는 가정 하에 임피던스 계산이 이루어진다. 그러나, 만약 시추공벽이 wash-out 등으로 확장되어 밀도검층 장비의 공벽 접촉이 불량하다면 검층 과정에서 밀도검층 자료가 왜곡되어 측정된다. 아쉽게도 잉어-1공이 시추될 당시 다수의 심도구간에서 시추공벽이 무너져 밀도검층 자료가 왜곡되게 측정되었으며 이를 사용하기 위해서는 보정이 필요하다.

이 논문에서는 2024년도에 군산 동소분지로부터 획득된 현장자료로부터 지하 물성 정보를 얻는데 필수적인 P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도를 추출하였다. 앞에서 언급한 군산 동소분지 현장자료들의 한계점을 극복하고 신뢰도 있는 임피던스 값들을 산출하기 위해 시추공벽 확장으로 왜곡이 발생한 밀도검층 자료의 보정방법을 제시하고, 탐사자료 내 시추공이 위치하지 않아 시추공 자료를 직접 사용할 수 없는 경우, 최적의 LFM 구축을 위한 방법을 제안하였다.

서해 군산분지 지질

서해 중부에 위치한 군산분지는 백악기부터 초기 마이오세 시대에 퇴적된 비해양성 퇴적층으로, 면적이 30,000 km² 이상이며 두께가 대부분 2-3 km, 최대 6 km에 이른다(Shinn *et al.*, 2010). 다수의 단층과 배사구조를 포함하고 있는 지질학적 특성으로부터 탄화수소 집적

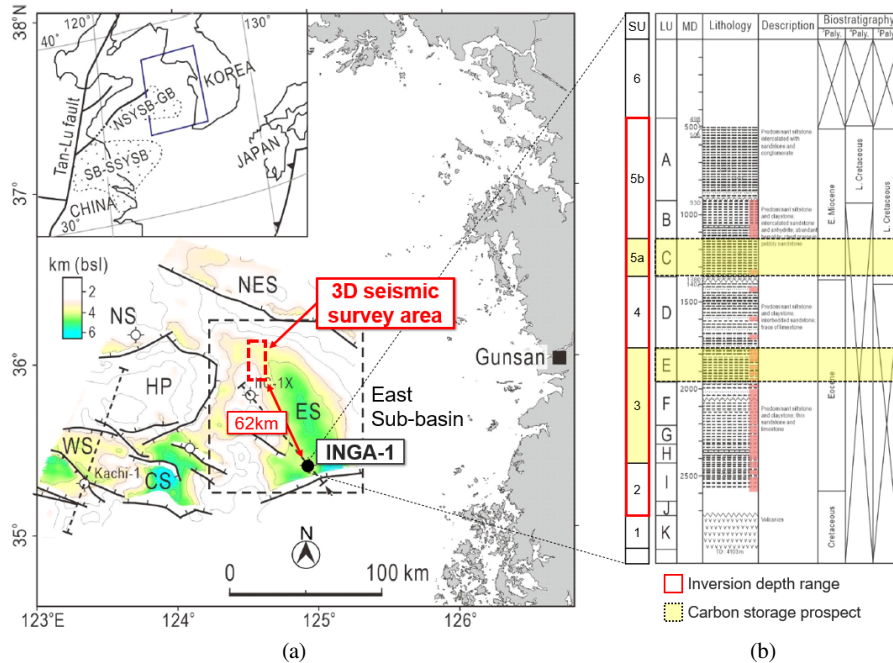


Fig. 1. (a) Geological structure of the Gunsan Basin and its Sub-basins; (b) Stratigraphic column of the INGA-1 well and identified storage prospects. The location of Eastern Sub-Basin is marked by a dashed red box in (a), and the primary and secondary carbon storage prospect is marked by a dashed black box in (b) (Modified from Song *et al.* (2022)).

가능성을 보고 총 5공의 탐사시추가 이루어졌다. 비록 이 지역에서 탄화수소가 발견되지는 않았으나 이 시기에 탄화수소 발견을 목적으로 한 탄성파 탐사와 지질학적 연구가 활발히 이루어졌다. 분지는 군산분지 내부에 발달한 단층들과 해마 용기대에 의해 구분되고, CCS 저장소 확보를 위한 3D 탄성파 탐사가 이루어진 지역은 동소분지로 구분된 지역에 해당한다(Fig. 1(a)).

서해 군산분지에서 수행된 탐사시추 중 동소분지에서 수행된 잉어-1공은 동소분지 남쪽 주요 경계단층 인근에서 1989년에 시추하여 검층자료가 취득되었다(Fig. 1(a)). 총 4,100 m의 시추 깊이에서 백악기부터 전기 마이오세 퇴적층을 포함한다. 잉어-1공의 암상은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 특성에 따라 11개의 심도구간으로 구분된다(Waton *et al.*, 1989). 시추암편 분석을 통해 비교적 사암이 우세한 C, E 구간이 유망 저장층으로 분석되었다(Song *et al.*, 2022). 해당 유망 저장층에 대해 잉어-1공이 사암의 성숙도가 낮은 경계단층 인근에서 취득되었다는 점과 동소분지 북부에서 동일한 층서가 두껍게 발달한다는 점에서 남부보다 북부에서의 유망성이 더 높게 평가될 가능성이 있다. 이에 따라 동소분지 북부 지역에서 이산화탄소 지중저장에 대한 유망성 평가를 통해 정확한 저장용량 평가가 필요하다.

탄성파 및 물리 검층 현장자료

3D 탄성파탐사 자료

한국지질자원연구원은 물리탐사연구선 탐해3호를 활용하여 대규모 CCS 저장소 확보를 목적으로 2024년 서해 대륙붕의 군산분지 동소분지 북부의 유망 저장층에 대해 해양 3차원 탄성파 탐사를 수행하였다(Fig. 2). 탐사는 6개 스트리머를 이용하여 총 1,944개 채널에서 8초 동안 1 ms 샘플링 간격으로 수행되었고, Inline 254-655 (25 m 간격) 및 Xline 3837-6165 (12.5 m 간격) 범위의 약 25 × 10 km 규모 3D 탄성파 볼륨(seismic volume)을 취득하였다.

제로 위상화(zero-phasing), 잡음 감쇠(noise attenuation), 고스트 제거(de-ghosting), 다중반사 제거(multiple attenuation), 공간 진폭 보정(spatial amplitude compensation), 속도분석(velocity analysis)과 Kirchhoff 종합전 시간 구조보정(Kirchhoff pre-stack time migration)을 적용하였다. 속도분석 과정을 통해 탄성파 자료로부터 구간속도(interval velocity) 정보를 추출하였다. 자료처리가 완료된 탄성파 자료는 공통이미지모음(Common Image Gather; CIG)의 전체 중합(full stack)을 통해 만든 최종 구조보정 영상 자료와, 0°-10°, 10°-20° 그리고 20°-30°의 구간별 입사각별 중합(angle-stack)을 통해 각각 근거리(near), 중거리(mid), 원거리(far) 입사각별 부분중합(partial stack) 자료를 생성하였다. 이 부분중합 자료들은 각도별 탄성파 트레이스(seismic trace)에서 관찰되는 반사 이벤트(event)의 정렬 상태가 양호하고 진폭 특성이 전반적으로 유사하여 종합전 역산 입력자료로 활용하기에 적합하였다. 전체 중합 자료와 입사각 부분중합 자료가 역산에 이용되었다.

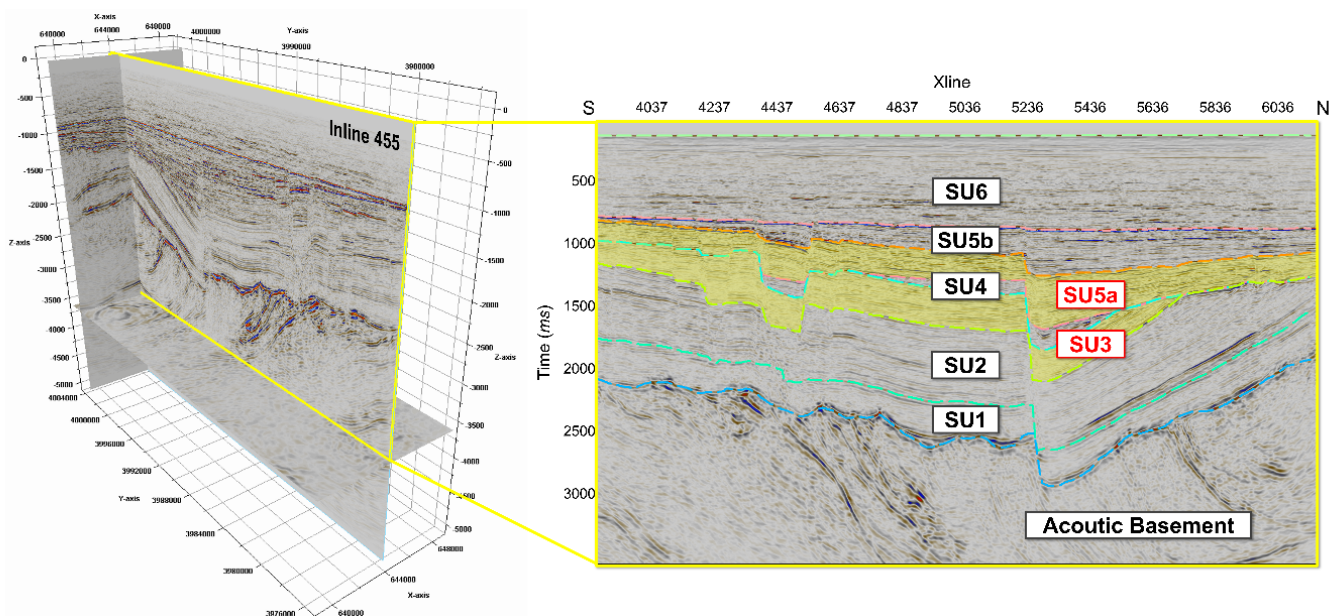


Fig. 2. 3D near angle-stack seismic data and 8 seismic units (SUs) defined from horizon interpretation (Inline 455).

탄성파 영상의 층서 해석

시대에 따라 탄성파 단위(Seismic Unit, SU)의 구분과 각 층서의 지질학적 특성을 규명하려는 선행 연구들이 수행되어 왔고(Ryu *et al.*, 2000; Yi *et al.*, 2003; Shinn *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2016), 이를 기반으로 3D 탄성파 탐사자료로부터 총 8개의 SU가 해석되었다(Fig. 2). 기반암(acoustic basement) 상부에 백악기-에오세 시기 동아시아 지역의 광범위한 내륙분지 발달 및 화산활동에서 기인한 퇴적층을 4개의 SU(SU1, SU2, SU3, SU4)로 구분하였다. 전기 마이오세의 주요 지각 역전에 의한 침식 부정합면 상부의 단일 광역 고지대로부터 기인한 초기 마이오세 퇴적층을 2개의 세부 SU(SU5a, SU5b)로 구분하였다. 중기 마이오세 이후 지각활동이 약화되고 열적 침강이 우세한 환경에서 퇴적된 해양 기원의 퇴적층을 SU6로 구분하였다. SU6 또한 SU5와 지각 역전에 의한 부정합면으로 구분된다. 두 번의 구조 역전과 대규모 압축에 따른 용기, 그리고 퇴적물의 삭박으로 인해 동소분지 전역에서 지층의 두께가 일정하지 않고 층서의 연속성이 떨어진다는(Shinn, 2015).

잉어-1공 시추공 자료

잉어-1공에서 물리검층을 통해 지층의 P파 속도와 밀도, 감마선(gamma ray)검층자료, 전기비저항(resistivity)검층자료, 중성자검층으로부터 계산된 공극율(neutron porosity), 자연전위(Spontaneous Potential; SP)검층자료, 공경 검층자료(caliper log) 등이 취득되었다. 그러나, 군산분지의 주요 경계단층 인근 사암의 성숙도가 낮은 지역에서 취득된 잉어-1공은 많은 심도구간에서 공벽이 확장되어 밀도검층과 같은 일부 검층 자료에서 왜곡이 발생한 것으로 확인된다(Fig. 3). 측정된 밀도검층 자료의 품질 한계로 원 검층자료를 그대로 사용할 수 없어 검층 값의 보정이 필요하였다.

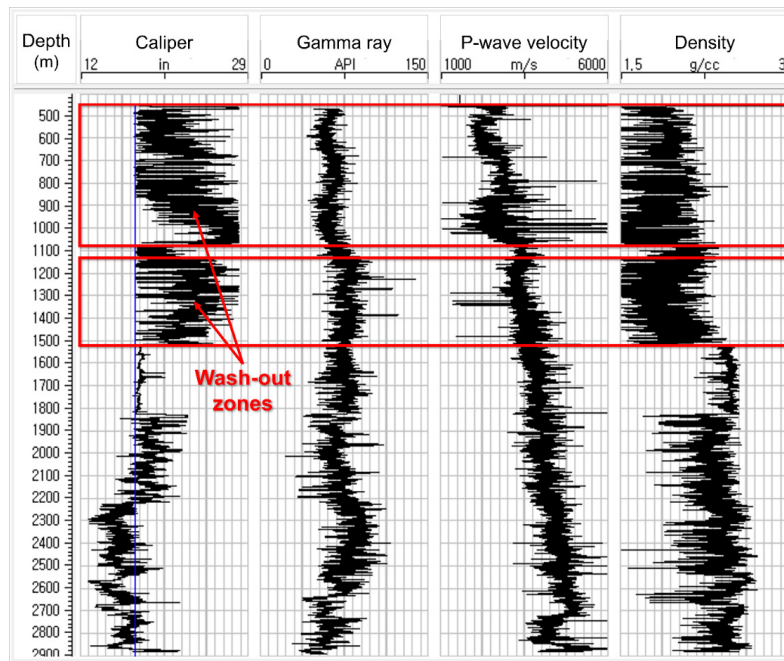


Fig. 3. Well log data from the INGA-1 well. The red boxes indicate wash-out zones.

임피던스 역산 공정

이 연구에서는 대상 지역의 시추공이 부재한 조건에서 합리적인 물성정보를 도출하기 위한 일련의 역산 공정을 구축하였다(Fig. 4). 중합전 역산(prestack inversion)을 수행하기 위해서는 P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도에 대한 LFM, 입사각별 중합(angle-stack)된 탄성파 자료, 파형(wavelet) 정보, 층서(horizon) 경계면 정보, 그리고 LFM 구축 및 배경 트렌드 반영을 위한 시추공 검층 자료가 필요하다. 그러나 이 지역에서는 시추공 부재로 인하여 기존의 전통적인 방식으로 LFM을 구축하기에는 어려움이 따른다. 이에 따라 보다 안정적인 물성 추정 가능한 중합후 역산(poststack inversion)을 우선 수행하여 P파 임피던스를 추출하고, 이를 기반으로 LFM을 구축하여 중합전 역산의 초기모델로 활용하였다. 중합후 역산의 입력자료로 사용된 초기 P파 임피던스 모델은 탄성파 자료 처리를 통해 생성된 구간 속도모델을

P파 임피던스로 변환하여 사용하였다. 이때 P파 속도와 밀도 간 관계식을 설정하기 위해 정확한 현장 특성을 반영하고자 같은 동소분지의 층서를 공유하는 잉어-1공 검층 자료에서 추출한 관계식을 활용하였다. 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 중합전 역산을 통해 P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도, 그리고 속도비(V_p/V_s)를 추정하였다.

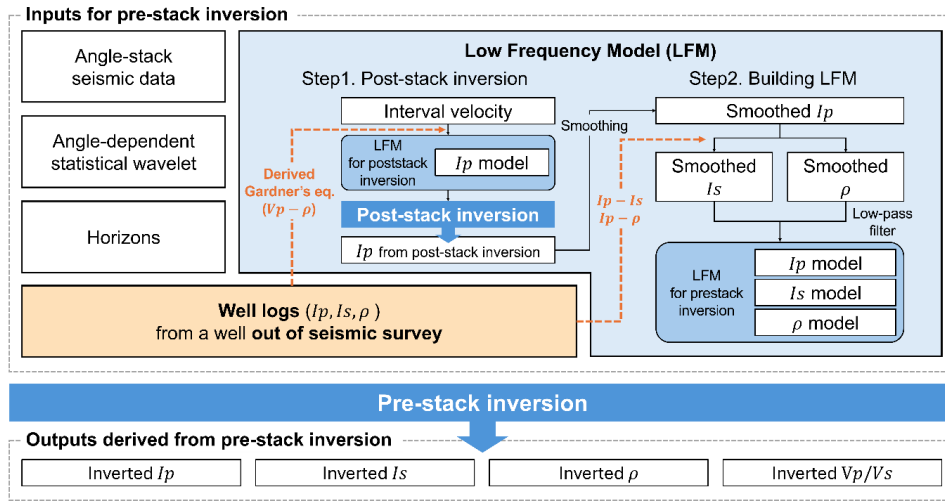


Fig. 4. Proposed workflow for prestack impedance inversion in areas without a well. I_p , I_s and ρ denote P-impedance, S-impedance, and density, respectively.

중합후 역산을 선행하는 이유는 다음과 같다. 중합후 역산에 사용되는 전체 중합 자료는 중합전 자료에 비해 중합 과정을 거치면서 잡음이 크게 감소하고, 역산 과정에서 추정해야 하는 해가 P파 임피던스 하나이기 때문에 해의 비유일성(non-uniqueness)이 작아, P파, S파 임피던스들과 밀도를 동시에 추정하는 중합전 역산보다 안정적으로 결과를 도출할 수 있다. 또한 물성정보 간 상관관계가 존재한다는 것이 알려져 있기 때문에(Castagna *et al.*, 1985; Avseth *et al.*, 2005), 중합후 역산으로 추정된 P파 임피던스를 통해 다른 물성정보(S파 임피던스, 밀도)도 간접적으로 추정할 수 있다. 하지만 이러한 상관관계를 통해 추정된 물성은 중합과정을 통해 입사각 정보가 소실되어 정확한 S파 임피던스나 밀도를 계산하는데 정확도가 떨어지기 때문에 입사각에 따른 P파, S파 반사에너지의 변화를 고려하여 보다 정확한 지하 물성을 추출하기 위해서는 중합전 임피던스 역산을 수행해야 한다.

중합후 역산 알고리즘으로 Linear Programming Sparse Spike (LPSS) 역산 기법 (Li, 2002)을 적용하였다. Sparse spike 기법은 작은 반사계수를 무시하고 큰 반사계수만을 남겨 층서의 확실한 구분이 가는 층들에 의한 반사계수만을 추출하는 것을 목표로 한다. 이 과정에서 L1 norm의 최소화로 인해 잡음뿐만 아니라 얇은 층에 대한 세부 정보가 손실될 수 있으나, 보다 명확한 반사점을 가지는 P파 임피던스를 산출할 수 있다. 이 연구에서 중합후 역산의 목적은 중합전 역산을 위한 LFM 구축으로, 자세한 정보보다는 주요 층의 각 위치 및 층별로 정확한 임피던스 값의 확보가 중요하기 때문에 LPSS 기법을 채택하였다. 또한 LPSS 기법은 모델 기반 역산기법처럼 초기 반사계수를 LFM로부터 추정하지 않고, 정확한 반사계수를 먼저 생성한 후 LFM 으로부터 저주파수 정보를 보강하는 디컨볼루션(deconvolution) 방식으로 볼 수 있다(Veeken and Da Silva, 2004). 이 연구의 중합후 구조보정에 사용한 LFM 은 구간속도로부터 생성되어 초기 반사계수 생성에는 매우 제한적인 영향을 주기 때문에, LPSS 기법이 적합하다고 판단하였다.

중합전 임피던스 역산은 Simultaneous inversion 기법(Hampson *et al.*, 2005)을 통해 수행되었다. Simultaneous inversion 기법은 P파 임피던스, S파 임피던스, 그리고 밀도 LFM을 초기값으로 이용하여 모든 입사각별 중합자료로부터 동시에 역산이 수행되는 알고리즘을 가진 것이 특징이다. 이 알고리즘은 식 (1)에 나타낸 Modified Fatti equation을 이용한다(Fatti *et al.*, 1994; Hampson *et al.*, 2005).

$$T(\theta) = \tilde{c}_1 W(\theta) D \ln(I_p) + \tilde{c}_2 W(\theta) D \Delta \ln(I_s) + c_3 W(\theta) D \Delta \ln(\rho) \quad (1)$$

이 수식에서 $\tilde{c}_1 = \frac{1}{2}c_1 + \frac{1}{2}kc_2 + mc_3$, $\tilde{c}_2 = \frac{1}{2}c_2$ 이고, 입사각별 파형 $W(\theta)$ 와 미분연산자 D 가 사용된다. 또한, Fatti *et al.* (1994)이 정의한 $c_1 = \tan^2\theta$, $c_2 = -8\gamma^2 \tan^2\theta$, $c_3 = -0.5 \tan^2\theta + 2\gamma^2 \sin^2\theta$, $\gamma = \frac{V_p}{V_s}$ 가 기반이 되며, 수식의 k 와 m , 그리고 $\Delta \ln(I_s)$ 와 $\Delta \ln(\rho)$ 은 물리

검층을 통해 취득한 P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도 값의 자연로그 간 선형관계인 배경 트렌드(background trend)를 통해 도출한다 (Simmons and Backus, 1996; Hampson *et al.*, 2005).

밀도 검층자료의 보정

밀도검층의 경우 콤프턴 산란(Compton scattering) 기반으로 측정되기 때문에 시추공벽이 무너진 심도구간에서는 시추공 주위 지층뿐만 아니라 시추공내 이수(drilling mud)의 밀도에 영향을 받기 때문에 신뢰성 있는 임피던스 계산을 위해서는 밀도검층 자료의 보정이 필요하다. 기존 잉어-1공 시추공자료에도 간격이 다른 두 감마선 검출기(detector)에서 검출한 감마선 계수율(counting rate)의 차이를 통해 측정된 밀도에서 이수의 영향을 보정하는 밀도보정검층이 있으나, 이러한 전통적인 보정방식은 시추공벽이 1-2 in 이상 확장될 경우 그 신뢰도를 잃는다고 알려져 있다(Ellis and Singer, 2007). 이에 따라 확장된 구간에 대한 밀도검층 자료 보정을 수행하였고 보정된 자료는 이후 모든 역산 과정에 걸쳐 적용되었다. 잉어-1공에서 취득된 공경검층 자료와 밀도검층 자료 사이의 상관관계를 분석한 결과, 두 변수 간에 지수함수 형태의 관계가 나타남을 확인하였다(Fig. 5(a)). 이는 시추공경이 확장됨에 따라 이수의 밀도가 검층 결과에 반영되며, 확장 정도에 비례하여 측정된 검층값에 지층의 밀도보다 이수의 밀도가 우세하게 반영된다는 것을 의미한다.

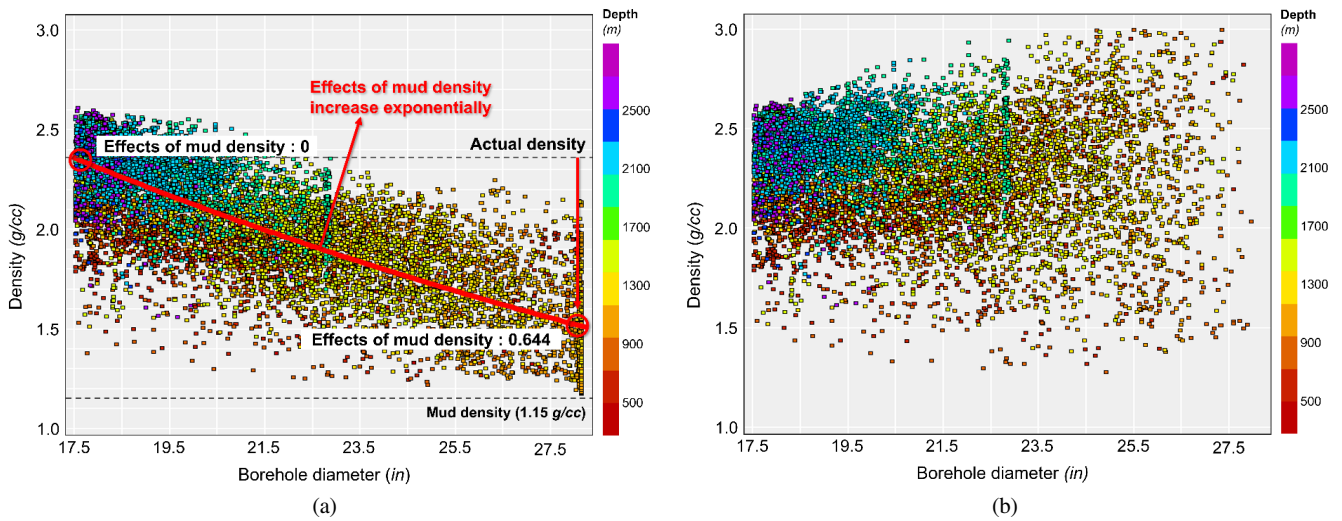


Fig. 5. Crossplot of caliper log (x-axis) and density log (y-axis) (a) before correction; (b) after correction, The red line represents exponential regression.

이러한 효과를 보정하기 위해 Doll (1949)과 Liu and Zhao (2015)는 겉보기 거리계수(apparent geometric factor, G)의 개념을 도입하였다. G_{mud} 는 밀도 측정 시 이수의 영향에 대한 가중치로, 공경과 비례하여 변화한다. 보정식의 주요 개념은 공경에 따른 이수의 가중치인 G_{mud} 를 이용하여 보정 과정에서 이수의 영향을 제거하고, 측정된 밀도 중 실제 지층의 밀도를 추정하는 것이다. 이 연구에서 이수 밀도는 시추 당시 사용된 이수의 밀도를 시추 보고서로부터 확인하였고(Marathon Petroleum Korea, Ltd., 1989), G_{mud} 는 공경검층 자료와 밀도검층 자료 사이의 상관관계 분석을 통해 도출하였다(Table 1).

밀도검층 보정은 다음의 식들을 통해 수행되었다(Liu and Zhao, 2015; de Macedo *et al.*, 2020).

$$m = \frac{Cal_{max} - Cal_{min}}{G_{max} - G_{min}} \quad (2)$$

$$G_{mud} = \frac{Cal - Cal_{min}}{m} + G_{min} \quad (3)$$

$$\rho_b = \frac{\rho_a - G_{mud}\rho_{mud}}{1 - G_{mud}} \quad (4)$$

위 식들에서 Cal 은 공경검층 값을 의미하고, 이 공경검층 값을 가질 때 밀도검층 값에 포함되는 이수 영향의 가중치를 G_{mud} 로 정의한다. 시추공이 최대로 확장된 경우의 공경검층 값을 Cal_{max} 로 두고 이때 $G_{mud} = G_{max}$ 로 정의한다. 반대로 공벽이 무너지지 않은 구간의 공경검층 값은 Cal_{min} 으로 두고 이때 $G_{mud} = G_{min}$ 으로 정의한다. 또한 식(4)에서 ρ_a 와 ρ_b 는 각각 측정 밀도검층 값과 보정된 밀도를 나타낸다.

Cal_{min} 과 Cal_{max} 는 각각 공경검층의 최소, 최대 측정값인 17.5 in, 28 in로 설정하였다. 공벽이 안정적인 구간에서는 이수의 영향이 없다고 가정하여 $G_{min} = 0$ 으로 결정하였다. G_{max} 는 공경검층 값과 밀도검층 값의 관계를 회귀분석하여 도출한 지수함수 형태의 경험식을 확장하여 산정하였다. 경험식에서 밀도검층 값이 이수의 밀도인 1.15 g/cc에 해당할 때의 공경검층 값인 Cal_{mud} 를 구하고, 이 조건에서 $G_{mud} = 1$ 로 가정하였다. $G_{mud} = 0$ 일 때의 Cal_{min} 과 $G_{mud} = 1$ 일 때의 Cal_{mud} 를 기준으로, Cal_{max} (=28in)에서의 G_{max} 를 두 공경 값 사이의 상대적 위치로부터 계산하였다.

보정에 사용된 변수들은 Table 1과 같다.

Table 1. Input parameters used for density log correction.

Mud weight	9.6 ppg (=1.15 g/cc)
Cal_{min}	17.5 in
G_{min}	0
Cal_{max}	28 in
G_{max}	0.644

공경검층 값을 기반으로 보정하는 이 방법은 기계식 공경검층의 최대 측정 범위(28 in)를 초과하는 구간에서는 시추공 공경을 정확히 측정할 수 없어 적용이 불가능하다. 공경이 28 in를 초과하는 심도 구간은 전체 심도 구간의 7.3%를 차지하였다. 이 구간을 포함할 경우 최종 역산 결과가 왜곡될 가능성이 있다고 판단하여, 이 연구에서는 해당 심도 구간을 이후 분석에서 제외하였다(Fig. 6). Fig. 6에서 보듯이 wash-out으로 인해 공경이 확장된 심도구간의 밀도검층 값들이 합리적인 암석들의 밀도 값 범위내로 들어왔고 공경이 확장되지 않은 심도 구간에서는 보정 전의 밀도검층 값들과 거의 일치함을 볼 수 있다. 또한 밀도검층을 보정하기 전에 공경검층과 밀도검층 간 지수함수 형태의 관계가 나타나는 것과 달리 보정 후 두 검층들 사이의 상관관계가 없어진 것을 확인할 수 있다(Fig. 5(b)).

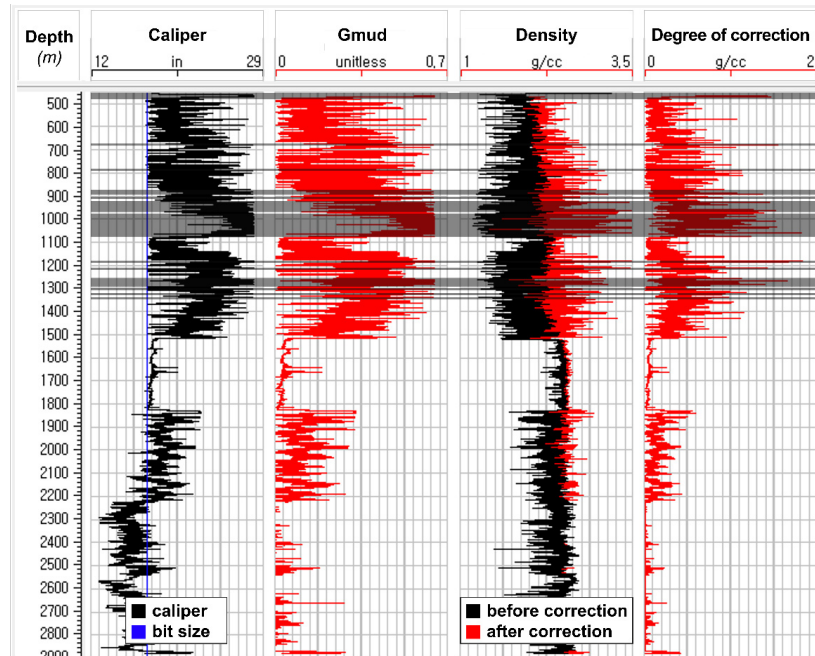


Fig. 6. Result of the correction of the density log at INGA-1 well. The depth intervals excluded in analysis are marked in gray color.

중합후 임피던스 역산을 통한 LFM 구축

중합후 역산에는 크게 중합 탄성파 자료, 층서 해석 자료, LFM, 파형요소 정보가 필요하다. LFM은 지층의 구간속도를 기반으로 생성하였다. 앞서 보정을 통해 얻은 밀도검층 값들과 P파 속도검층으로부터 가드너 식(Gardner's equation) (Gardner *et al.*, 1974)의 변수들을 도출하였으며, 이를 이용하여 얻은 P파 속도와 밀도 간의 상관관계 식인 식 (5)를 구간속도로부터 밀도를 계산하는 데 사용하였다. 이 두 값의 곱으로부터 초기 P파 임피던스를 계산하고 구조적 평활화(structural smoothing)를 적용하여 최종 LFM을 구축하였다(Fig. 7).

$$\rho = 0.344 V_P^{0.427} \quad (5)$$

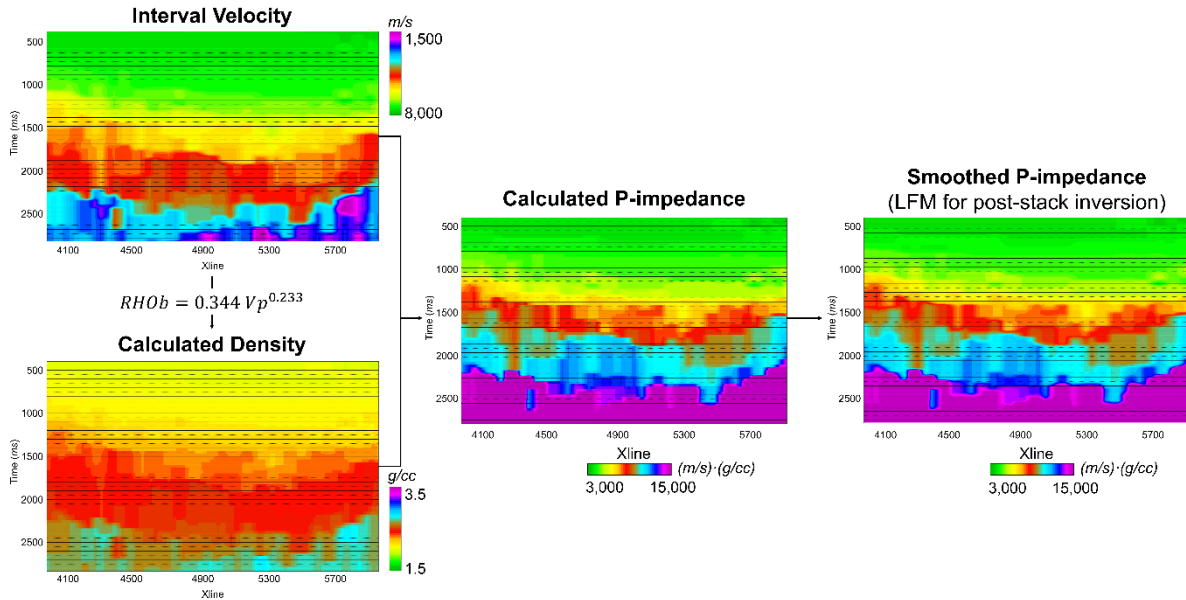


Fig. 7. Processing to construct low-frequency model (LFM) for poststack inversion.

역산 과정에서 반사계수와 파형의 컨볼루션(convolution)하여 만들어진 합성 탄성파 트레이스(synthetic trace)를 실제 트레이스와 비교하므로, 정확한 파형을 사용하는 것이 매우 중요하다. 파형은 시간에 따라 변화할 수 있으므로, 시간 가변적 특성을 분석하여 반영해줘야 한다. 이를 위해 층서 해석 결과를 바탕으로 층서별 진폭 스펙트럼 분석을 수행하여, 주파수 특성이 뚜렷하게 구분되는 구간을 확인하였다. 그 결과 전체 구간을 세 개의 영역(SU5, SU4-SU3, SU2)으로 분할하였으며, 각 구간에서 128 ms의 파형을 추출하였다(Fig. 8). 추출한 파형에 따라 역산도 동일하게 세 구간으로 나누어 수행하였다.

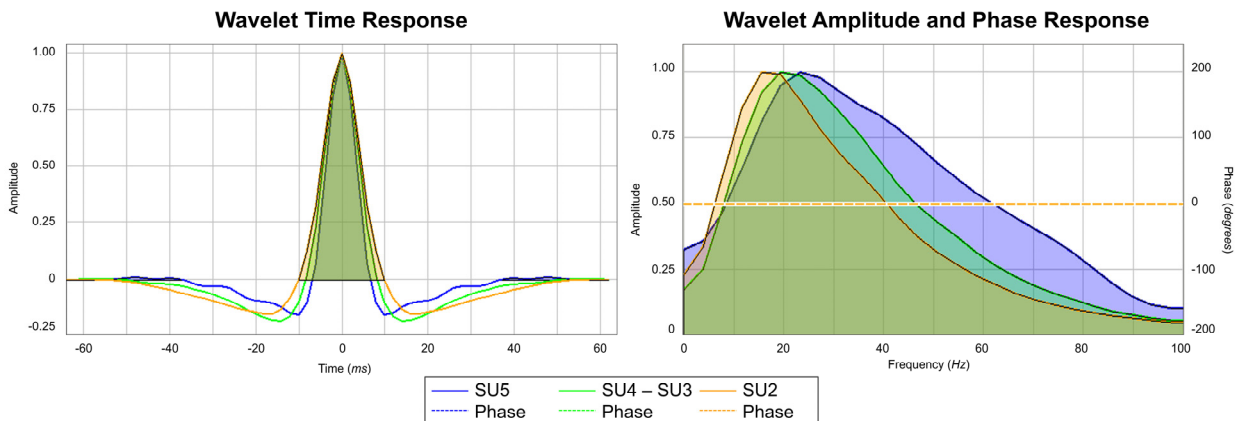
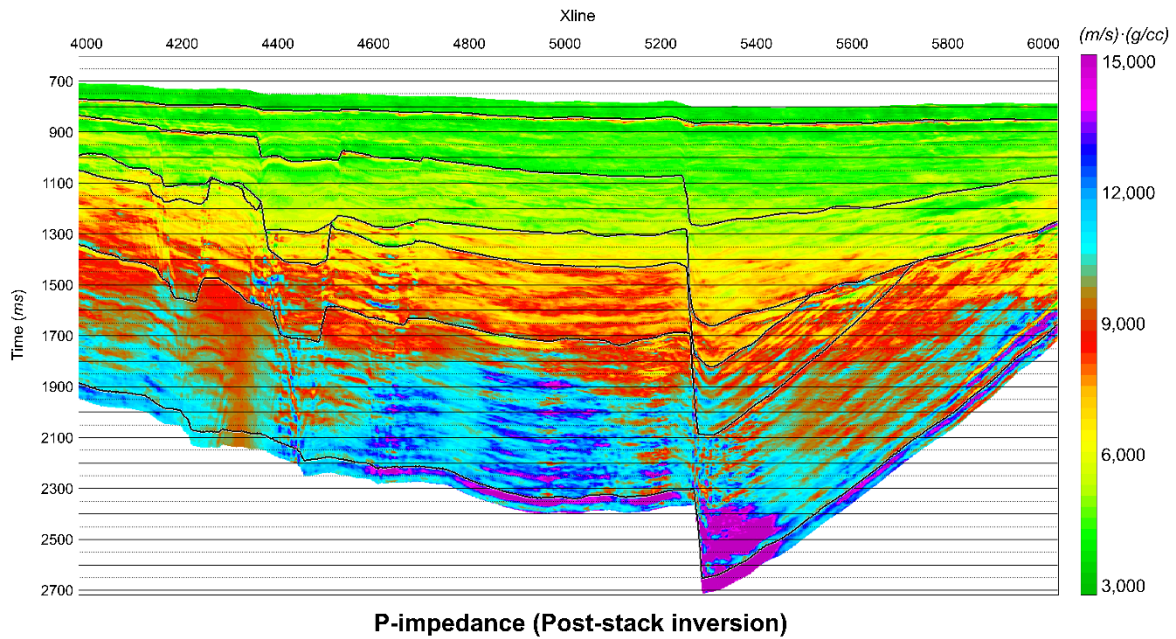
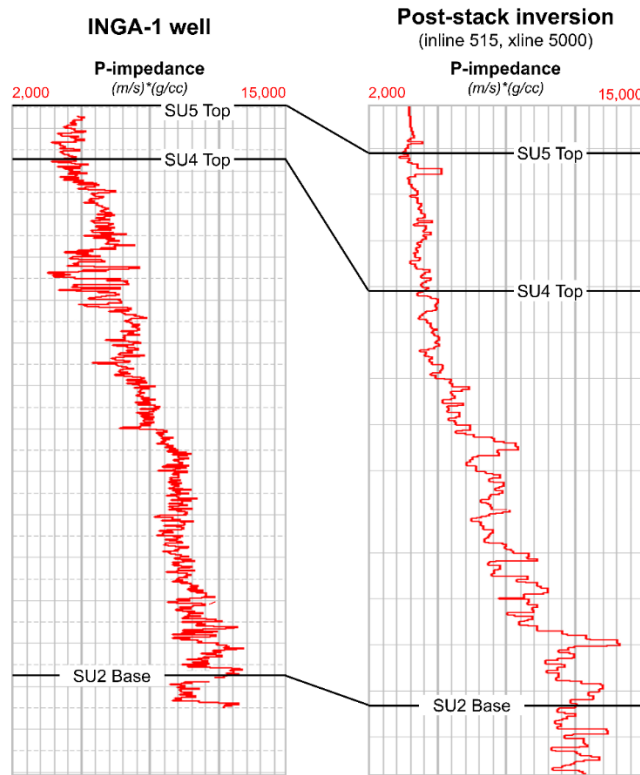


Fig. 8. Statistical wavelets extracted from field data for poststack inversion.

이러한 일련의 과정을 통해 P파 임피던스를 도출하였다. 결과적으로 추정된 P파 임피던스는 층 경계가 명확하고 각 층에서 일관된 임피던스 값을 보인다(Fig. 9(a)). 또한 잉어-1 시추공 자료와의 비교에서 동일한 층에서 유사한 임피던스 범위를 보임으로써 결과의 신뢰성을 확인하였다(Fig. 9(b)).



(a)



(b)

Fig. 9. Result of poststack inversion. (a) Inverted P-impedance along inline 515; (b) comparison of the P-impedance log from the INGA-1 well with the inverted P-impedance at inline 515, xline 5000.

도출된 P파 임피던스는 다음단계인 중합전 임피던스 역산의 LFM 구축을 위해 구조적 평활화를 수행하였다. 이는 아주 세부적인 반사 계수나 인위적 잡음(artifact)을 제거하고 일반적인 경향만을 남겨, 이후 물성 정보 추정 과정에서 비정상적인 값이 산출되는 것을 방지하기 위함이다. 평활화된 P파 임피던스(I_p)는 잉어-1 시추공 해석을 통해 얻은 물성 간 관계식을 적용하여 S파 임피던스(I_s)와 밀도(ρ)로 변환하였다. 물성 간 관계식을 도출하기 위해 검층값들 사이 회귀분석을 수행하였고, 그 관계식은 다음과 같다.

$$I_s = 0.0238 I_p^{1.346} \quad (6)$$

$$\rho = 0.183 I_p^{0.281} \quad (7)$$

P파 임피던스와 S파 임피던스 간 경험식의 적합도는 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 0.9839, 평균절대백분율오차(mean absolute percentage error, MAPE)는 3.98%, 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient, r)는 0.9912로 높게 나타났다. P파 임피던스와 밀도 간 경험식은 R^2 는 0.5401, MAPE는 5.22%, r 은 0.7230으로 중간 수준의 적합도를 보였다.

이렇게 얻어진 세 가지 물성 모델(P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도)들에 각각 5 Hz 이하 주파수 통과필터(low-pass filter)를 적용하여 중합전 역산의 초기값으로 사용되는 LFM을 구축하였다(Fig. 10).

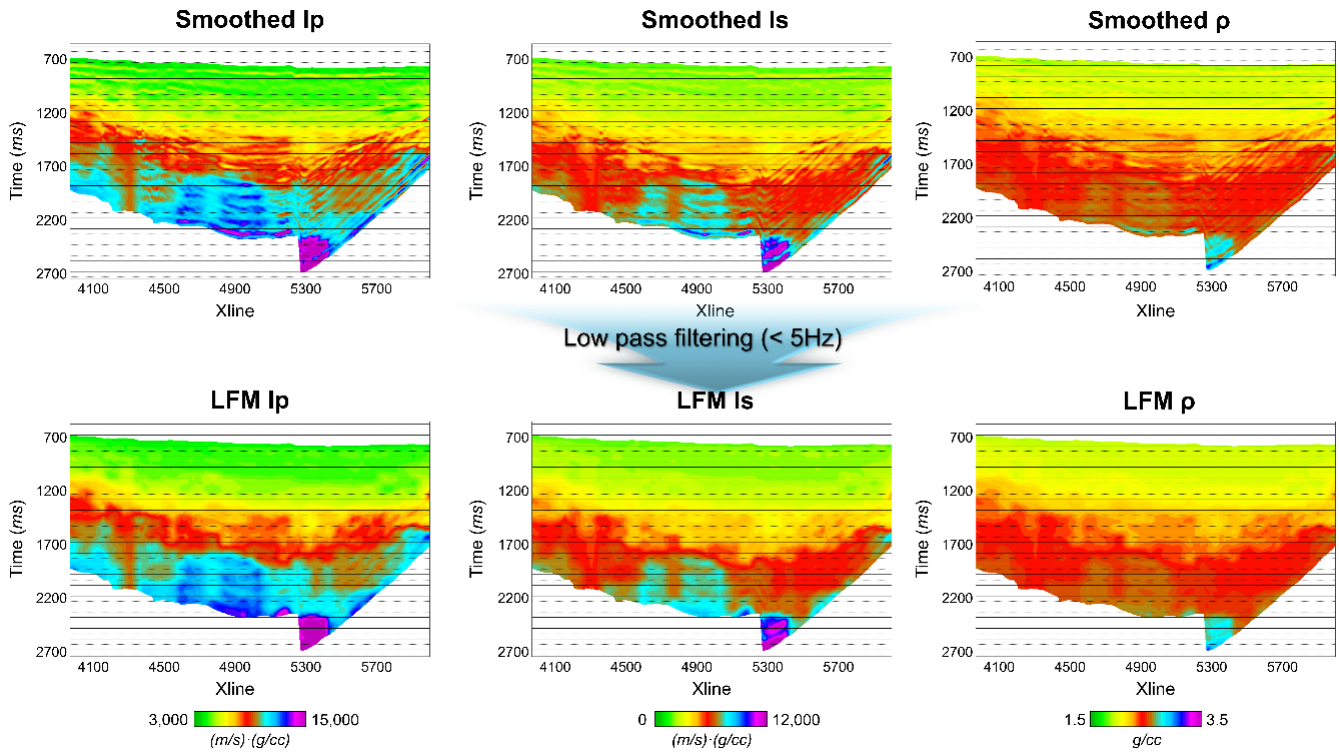


Fig. 10. Processing to constructing low-frequency model (LFM) for prestack inversion. A 5 Hz low-pass filter was applied to generate the LFM.

중합전 임피던스 역산 및 결과분석

앞서 수행한 중합후 임피던스 역산과 마찬가지로, 주파수 특성에 따라 자료를 SU5, SU4-SU3, SU2 세 구간으로 구분하여 입사각별로 파형을 통계학적으로 추출하였다.

최종적으로 도출한 P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도, 그리고 속도비(V_p/V_s)는 Fig. 11부터 Fig. 13에 도시되어 있다. Fig. 11은 inline 515에서의 단면도를 Fig. 12와 Fig. 13는 1,200 ms와 1,600 ms일때의 time slice를 보여주고 있다.

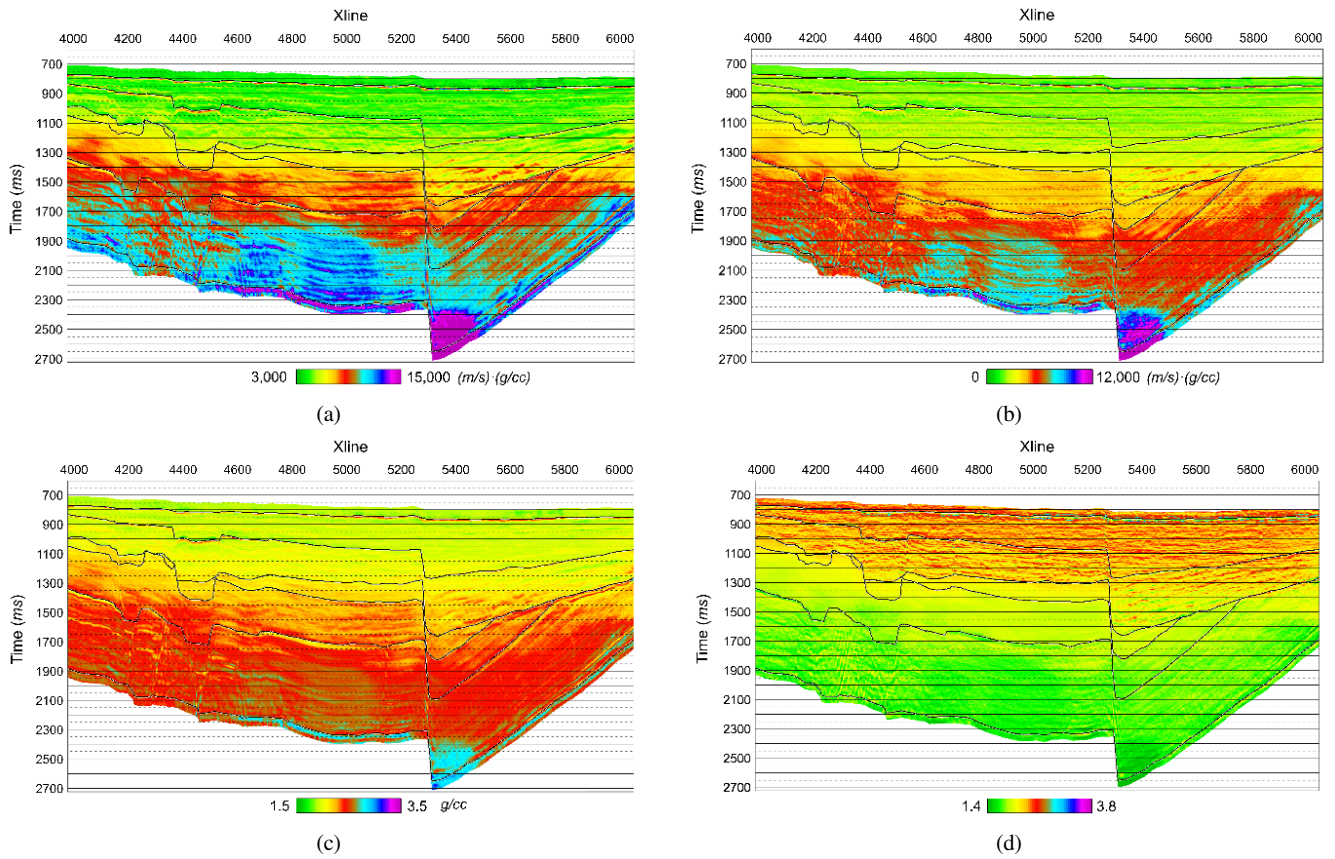


Fig. 11. Results of prestack impedance inversion (Inline 515): (a) P-impedance; (b) S-impedance; (c) Density; (d) Vp/Vs.

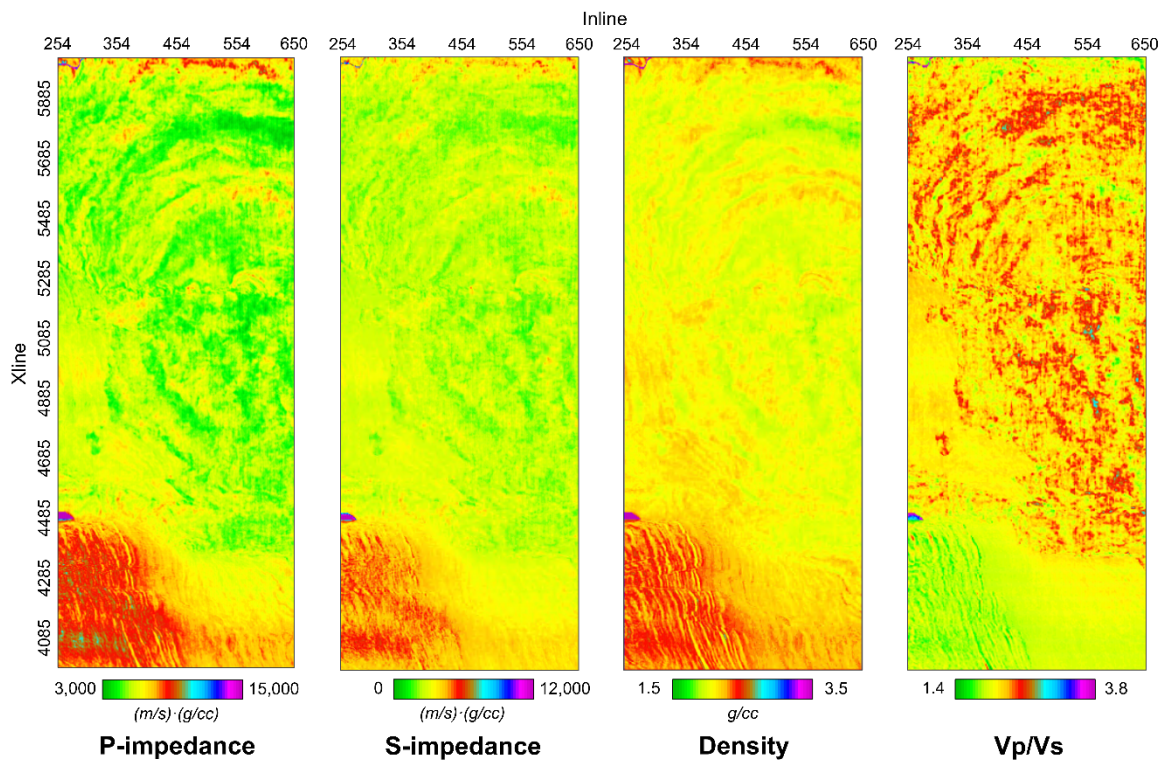


Fig. 12. Time slices of prestack impedance inversion results at 1200 ms. (a) P-impedance; (b) S-impedance; (c) Density; (d) Vp/Vs.

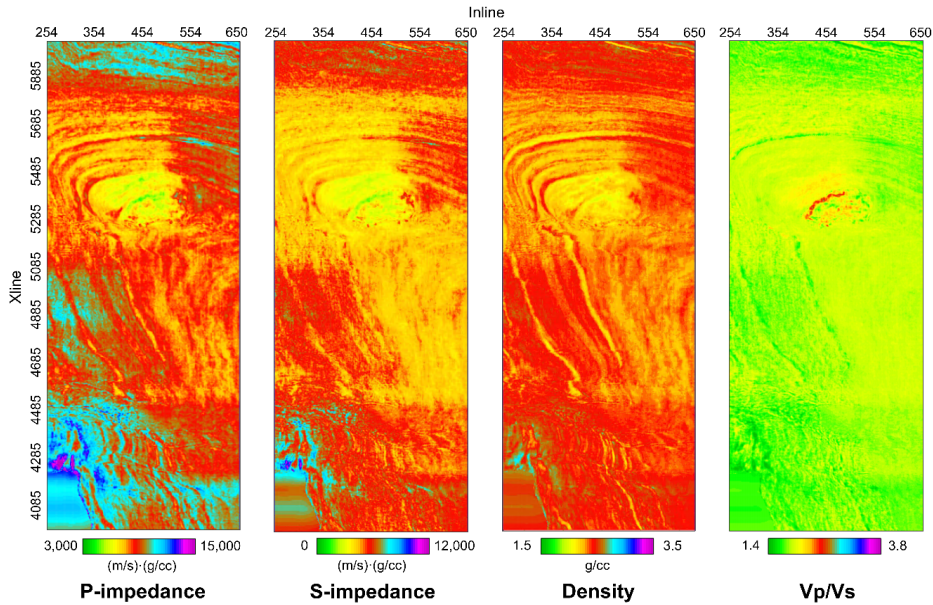


Fig. 13. Time slices of prestack impedance inversion results at 1600 ms. (a) P-impedance; (b) S-impedance; (c) Density; (d) Vp/Vs.

P파 임피던스와 S파 임피던스는 심도 증가에 따라 퇴적물의 압밀(compaction) 효과로 인해 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 동일한 층서 내에서도 이러한 임피던스 값들은 수평적으로 변동성을 보인다. 반면, 속도비는 심도보다는 암상의 변화에 더 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Avseth *et al.*, 2007; Teixeira *et al.*, 2023). Fig. 11(d)에 제시된 속도비 역산 결과에서, 800 ms에서 1,300 ms 사이에 해당하는 SU5b와 SU5a에서 동일한 지층 내에서 일정한 속도비의 범위가 유지되며, 범위 내에서 암상에 따른 속도비 값의 명확한 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 1,300 ms에서 상부와 하부 지층 간 속도비의 범위가 뚜렷하게 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 비록 이 연구에 사용된 탄성파 자료에는 시추공 자료가 존재하지 않아 특정 깊이에서의 물성값을 통해 역산 결과에 대한 직접 검증은 어렵지만, 동일한 층서 내에서의 일관된 경향성과 층서 간 뚜렷한 변화를 통해 이 연구의 임피던스 역산 결과가 지질학적 구조와 암상 변화를 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

이 연구에서는 일련의 임피던스 역산 과정을 통해 두 가지 종류의 음향 임피던스 모델, 중합후 및 중합전 역산을 통한 임피던스를 도출하였다. 중합전 임피던스 역산은 중합후 역산에 비해 더 많은 탄성파 정보를 활용하므로, 결과적으로 지질구조와 반사면의 물성 차이를 보다 정밀하게 반영할 수 있다. Fig. 14의 확대된 단면에서 확인되듯이, 중합전 역산 결과는 탄성파 진폭의 변화를 보다 정확히 재현하였으며, 층서 간 물성 경계가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 또한, Fig. 15에서 보이듯이 단층 구간에서 중합전 역산결과가 단층면의 연속성과 구조를 보다 명확하게 구현되었다. Fig. 16에서는 지층의 삭박이 동반된 불연속면에서 지층 구조가 명확히 표현되어 해석이 왜곡될 가능성을 최소화한 역산 결과를 제공함을 확인할 수 있다.

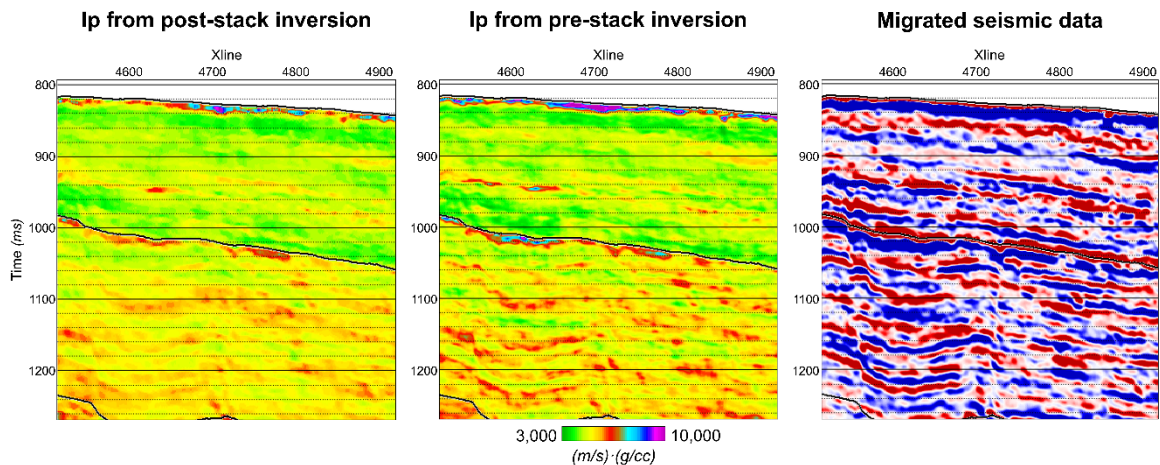


Fig. 14. Comparison of P-impedances from poststack and prestack inversion in a continuous formation. (a) Ip from poststack inversion; (b) Ip from prestack inversion; (c) Migrated seismic data.

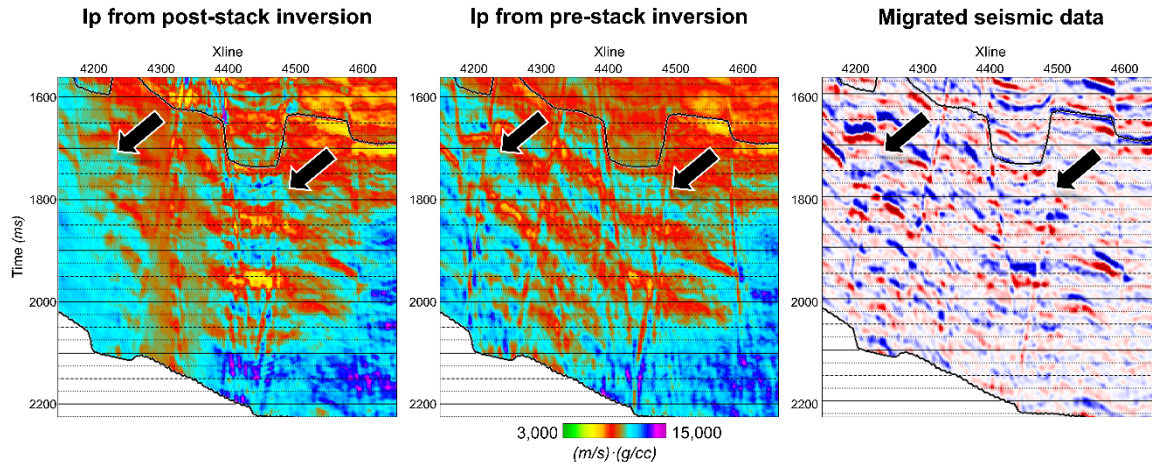


Fig. 15. Comparison of P-impedances from poststack and prestack inversion around fault zones. (a) Ip from poststack inversion; (b) Ip from prestack inversion; (c) Migrated seismic data.

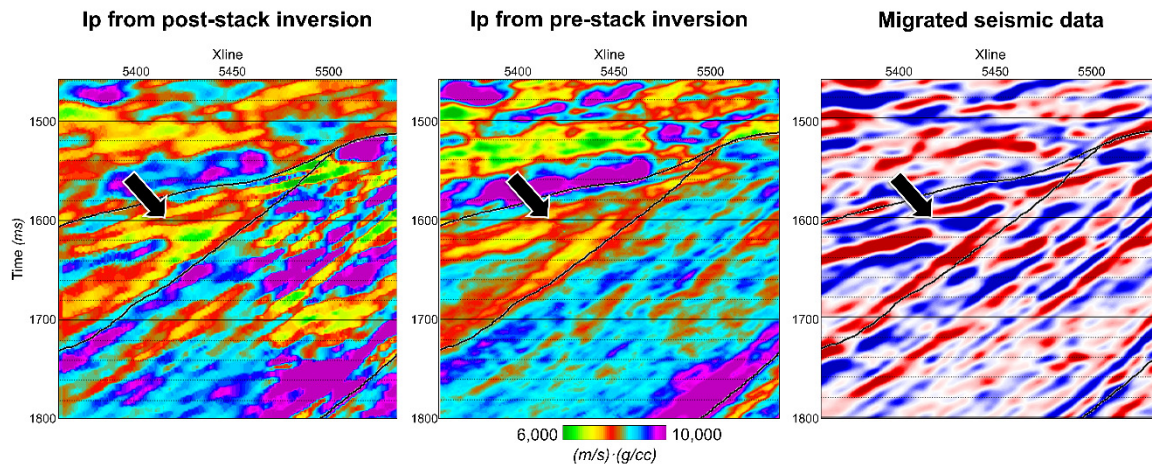


Fig. 16. Comparison of P-impedances from poststack and prestack inversion in discontinuity. (a) Ip from poststack inversion; (b) Ip from prestack inversion; (c) Migrated seismic data.

한편, 임피던스 역산의 품질은 LFM의 정확도에 크게 좌우된다. 특히 중합전 역산 결과는 LFM 구축 시 사용된 중합후 임피던스 역산의 초기모델인 구간속도에 대한 의존도가 높다. 따라서 속도분석이 부정확하게 수행된 구간에서는 역산 결과의 신뢰도가 저하될 수 있다. Fig. 11(a)에서 보이듯이 일부 단층 부분(xline 5,400, time 2,500 ms 부근)에서 임피던스가 불연속적으로 나타나거나 주변과 상이한 분포를 보이는데, 이는 단층에 의한 속도 이상 또는 속도분석 오차에 기인한 것으로 해석된다.

결론

이 연구에서는 서해 군산분지 내 동소분지 북부 해상에서 확보된 3차원 탄성과 탐사자료로부터 지하물성 추정을 위한 역산을 수행하였다. 탐사지역 내 시추공의 부재로 인해 탐사지역과 지층을 공유한 잉어-1 시추공 자료를 이용하였다. 하지만 잉어-1 시추공의 경우 wash-out으로 인해 시추공 공경 변화가 심하며 이로 인해 이수의 영향으로 밀도 검층값이 심하게 왜곡되었다. 이러한 문제점들을 극복하고 중합전 임피던스 역산을 통해 합리적인 물성 정보 도출을 위해 밀도 검층을 보정하고 중합후 임피던스 역산 결과를 이용하여 중합전 임피던스 역산을 위한 LFM을 구축하였다.

밀도 검층 보정을 위해 공경 검층과 밀도검층 측정 값 사이의 상관관계를 기반으로 겔보기 거리계수(G)를 도출하여 측정된 밀도값에서 이수의 영향을 제거하였으며, 이를 통해 실제 지층의 밀도를 복원하였다. 보정된 밀도 검층자료는 보다 정확한 물성 정보간 관계식을 도출

하는 데 기여하였다.

중합후 임피던스 역산은 LPSS inversion 기법을 이용하여 안정적이고 잡음에 강한 P파 임피던스를 도출하였고, 이 결과를 기반으로 구조적 스무딩 및 물성 간 관계식을 이용해 S파 임피던스와 밀도 모델로 변환하였다. 세 물성 모델을 저주파수 통과 필터로 중합전 임피던스 역산을 위한 LFM을 구축하였고, 이를 이용하여 Simultaneous inversion 기법을 통해 각도별 중합자료로부터 P파 임피던스, S파 임피던스, 밀도, 그리고 속도비(V_p/V_s)를 도출하였다.

이러한 합리적인 결과 도출을 위한 공정 구축을 통해 시추공이 부재한 탐사 지역에서 탄성파 기반 물성 추정 가능성을 제시하였다. 추정된 물성은 유망저장층의 저장용량 및 안정성 평가에 이용하여 적절한 주입정 시추 위치 결정에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20233D00000090). 또한, 이 연구는 한양대학교 RISE.ML 컨소시엄의 재정 지원을 받아 수행되었습니다. 이 연구를 위해 소중한 현장 자료를 제공해 주신 한국지질자원연구원에 감사드립니다. The authors would like to thank GeoSoftware for providing the HampsonRussell software (HRS) license of academic version.

References

- Avseth, P., Mukerji, T., and Mavko, G., 2005, *Quantitative Seismic Interpretation: Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk*, Cambridge University Press.
- Avseth, P., Mukerji, T., Mavko, G., and Gonzalez, E., 2007, Integrating statistical rock physics and sedimentology for quantitative seismic interpretation, *Subsurface Hydrology: Data Integration for Properties and Processes*, **171**, 45-60.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Eastwood, R. L., 1985, Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *Geophysics*, **50**, 571-581.
- de Macedo, I. A. S., de Figueiredo, J. J. S., and de Sousa, M. C., 2020, Density log correction for borehole effects and its impact on well-to-seismic tie: Application on a North Sea data set, *Interpretation*, **8**, T43-T53.
- Doll, H. G., 1949, Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oil base mud, *Journal of Petroleum Technology*, **1**, 148-162.
- Ellis, D.V., and Singer, J.M., 2007, *Well Logging for Earth Scientists*, Vol. 692, Springer.
- Fatti, J., G. Smith, P. Vail, P. Strauss, and P. Levitt, 1994, Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3D seismic case history using the Geostack technique, *Geophysics*, **59**, 1362-1376.
- Gardner, G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R., 1974, Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps, *Geophysics*, **39**, 770-780.
- Hampson, D. P., Russell, B. H., and Bankhead, B., 2005, Simultaneous inversion of pre-stack seismic data, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1633-1637.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2024, *Technology Development for Storage Efficiency Improvement and Safety Assessment of CO₂ Geological Storage*, KIGAM (in Korean).
- Lee, C., Shinn, Y. J., and Ryu, I. C., 2016, Development of regional uplift and uplift-related strata in Gunsan Basin, Yellow Sea: implications for Cenozoic crustal extension, *International Geology Review*, **58(16)**, 2029-2045.
- Li, Q., 2002, sparse spike Inversion and the Resolution Limit, *CSEG Geophysics*, 1-4.
- Liu, Z. and J. Zhao, 2015, Correcting hole enlargement impacts on density logs for coalbed methane reservoirs, *The Open Petroleum Engineering Journal*, **8**, 72-77.
- Marathon Petroleum Korea, Ltd., 1989, *Final Well Report*, INGA-1 (unpublished).
- Presidential Commission on Climate Crisis Response (PCCCR), 2021a, *2050 Carbon Neutrality Scenario*, Secretariat of the 2050 Carbon Neutrality Committee (in Korean).
- Presidential Commission on Climate Crisis Response (PCCCR), 2021b, *2030 Nationally Determined Contribution (NDC) Enhancement (Draft)*, Policy material, Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth (in Korean).

- Ryu, I. C., Kim, B. Y., Kwak, W. J., Kim, G. H., and Park, S. J., 2000, Stratigraphic response to tectonic evolution of sedimentary basins in the Yellow Sea and adjacent areas, *Korean Journal of the Petroleum Geology*, **8**, 1-43. (in Korean with English abstract).
- Shinn, Y. J., 2015, Geological structures and controls on half-graben inversion in the western Gunsan Basin, Yellow Sea, *Marine and Petroleum Geology*, **68(A)**, 480-491.
- Shinn, Y. J., Chough, S. K., and Hwang, I. G., 2010, Structural development and tectonic evolution of Gunsan Basin (Cretaceous-Tertiary) in the central Yellow Sea, *Marine and Petroleum Geology*, **27(2)**, 500-514.
- Simmons, J. L. and M. M. Backus, 1996, Waveform-based AVO inversion and AVO prediction-error: *Geophysics*, **61**, 1575-1588.
- Song, I., Kim, K. Y., Lee, C., and Shinn Y. J., 2022, Porosity analysis of drill cuttings for seeking out reservoir formations suitable for CO₂ geological storage in Gunsan Basin, West Sea of Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, **58(3)**, 319-334. (in Korean with English abstract).
- Teixeira, L., Campos, M. T., Guerrero, J., Mund, V., Muzzete, M., and Brazil, F., Abreu, C., 2023. Rock-physics-assisted interpretation of elastic property of the geological environments in the Buzios field, Brazilian pre-salt, Eighteenth International Congress of the Brazilian *Geophysical Society*.
- Veeken, P.C.H. and Da Silva, M., 2004, Seismic Inversion Methods and some of their constraints, *First Break*, **22(6)**, 15-38.
- Watson, P.V., Bailey, H.W. and McGarva, R.M., 1989, *Well: Inga-1 stratigraphy of the interval 1,660'-13,461' (T.D.)*, Paleoservices Ltd., 23 (unpublished).
- Yi, S., Yi, S., Batten, D. J., Yun, H., and Park, S. J., 2003, Cretaceous and Cenozoic non-marine deposits of the northern South Yellow Sea Basin, offshore western Korea: Palynostratigraphy and palaeoenvironments, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **191**, 15-44.

김좌겸



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

설순지



1993년 서울대학교 자원공학과 공학사
1995년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1999년 서울대학교 자원공학과 공학박사
현재 한양대학교 자원환경공학과 연구교수
E-mail: ssjdoolly@hanyang.ac.kr

변중무



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