연구논문

포항 영일만 이산화탄소 지중저장 모니터링을 위한 주파수영역 역시간 구조보정 기반 4차원 시간경과 탄성파 기술의 적용성 검토

박세은¹ · 김대식² · 오주원^{3,4*} · 민동주⁵ · 김병엽⁶

¹전북대학교 환경에너지융합학과 석사과정, ²전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정, ³전북대학교 자원·에너지공학과 조교수, ⁴전북대학교 환경에너지융합학과 조교수, ⁵서울대학교 에너지자원공학과 교수, ⁶한국지질자원연구원 석유해저연구본부 해저지질탐사연구센터장

Review of the Applicability of 4D Time-Lapse Seismic Monitoring System Based on Frequency-Domain Reverse-Time Migration to Pohang CCS Demonstration

Sea-Eun Park¹, Dae-Sik Kim², Ju-Won Oh^{3,4*}, Dong-Joo Min⁵ and Byoung Yeop Kim⁶

¹Master's Degree, Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea
²Master's Degree, Department of Mineral Resources and Energy Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea
³Assistant Professor, Department of Mineral Resources and Energy Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea
⁴Assistant Professor, Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea
⁵Professor, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
⁶Head of Marine Geology and Geophysical Exploration Research Center, Petroleum and Marine Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

*Corresponding Author. Ju-Won Oh, juwon24@jbnu.ac.kr, Department of Mineral Resources and Energy Engineering, Jeonbuk National University, Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

Received

12 August 2021

Final version Received

7 September 2021

Accepted

26 October 2021

Abstract

CO₂ geosequestration has been attracting worldwide attention as a solution to reduce greenhouse gas emissions. In South Korea, the Pohang CCS demonstration project started in 2013. Although a small amount of CO₂ was successfully injected in early 2017, the demonstration stage for geophysical monitoring could no longer continue because of the Pohang earthquake that occurred in November 2017. In this study, we examine the applicability of 4D seismic time-lapse monitoring technology based on frequency-domain reverse-time migration to synthetic 4D time-lapse seismic data considering monitoring acquisition, which is planned for application in the Pohang CCS demonstration project. Assuming that the velocity drops because of injected CO₂ in the three monitoring stages, the amplitude variations caused by injected CO₂ are detected well using the planned monitoring system in the Pohang CCS demonstration project.

Key words : 4D time-lapse seismic monitoring, frequency-domain reverse-time migration, carbon capture and storage, Pohang CCS demonstration project

요약

2013년부터 포항 영일만에서 이산화탄소 지중저장 실증 프로젝트가 시작되었고, 2017년 초 소 규모 이산화탄소 주입에 성공하였지만, 같은 해 11월에 발생한 포항지진으로 인해 모니터링 실증

단계는 수행되지 않았다. 이 연구에서는 주파수영역 역시간 구조보정을 기반으로 한 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기술의 국내 적용성을 검토하기 위해, 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트에서 계획했던 모니터링 탐사를 가정한 수치모델링을 통해 인공합성 탐사자료에 주파수영역 역시간 구조보정 기반의 4차원 탄성과 모니터링 기술 적용 결과, 포항 영일만 지중저장 프로젝트에서 40개의 수신기를 이용해 설계되었던 모니터링 시스템을 반영하여 주입 이산화탄소에 의한 저장층에서의 진폭 변화 감지가 잘 되는 것을 확인하였다.

주요어: 4차원 시간경과 탄성과 모니터링, 주파수영역 역시간 구조보정, 이산화탄소 포집 및 저장, 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트

서 론

지구온난화로 인한 기후변화 문제가 대두되면서, 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 감축을 위하여 세계적으로 다양한 대책기술들이 논의되고 있다(IPCC, 2018). 그 중 이산화탄소 포집 및 저장(carbon capture and storage, CCS)은 온실가스 감축을 위한 유망한 기술로, 대량의 이산화탄소를 포집하여 적합한 조건을 갖는 심부 지하 지층구조에 장기간 저장하는 기술이다. 이러한 이산화탄소 지중저장 프로젝트는 노르웨이의 Sleipner 프로젝트(Kongsjorden *et al.*, 1998), 캐나다의 Weyburn-Midale 프로젝트(Whittaker and Gilboy, 2003), 독일의 Ketzin 프로젝트(Schilling *et al.*, 2009), 알제리의 In Salah(Ringrose *et al.*, 2013) 등 세계 곳곳에서 다양한 규모로 추진되었으며, 이산화탄소 주입 전 지중저장 부지선정 과정과 이산화탄소 주입 후 거동 파악을 위한 모니터링 과정에서 다양한 연구들이 수행되고 있다(Arts *et al.*, 2008; Torp and Gale, 2004; Iding and Ringrose, 2009; Mayer *et al.*, 2013).

이산화탄소 지중저장 부지에서 주입된 이산화탄소가 지표면으로 누출될 경우 생태계에 큰 위험을 초래할 수 있으며, 주입 이산화탄소가 단층을 재활성화 시키면서 지진을 유발할 가능성이 있다(Grigoli *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018; Stork *et al.*, 2015). 따라서 지속 가능한 이산화탄소 지중저장을 위해서는 저장기술의 안전성에 대한 사회적 수용성이 확보되어야 하며, 이를 위해서는 주입된 이산화탄소의 거동 파악을 위한 다양한 모니터링이 지속적으로 수행되어야 한다. 그 중에서 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기술(4D time-lapse seismic monitoring)은 주입된 이산화탄소에 의한 지하 매질의 물성변화를 감지하여 이산화탄소의 거동을 모니터링 하는 기술이다. 탄성과 탐사는 지하 지층의 반사면(reflector)에서 반사되어 되돌아오는 탄성과 신호의 왕복주시(two-way traveltimes)와 진폭(amplitude)을 수신기에서 기록하여, 지하 매질을 통과하는 탄성과의 속도, 반사면의 깊이 등을 추정하는 기법이다. 주로 유·가스전 탐사를

목적으로 기술이 개발되어 왔으나, 최근에는 이산화탄소 지중저장 부지 탐사를 목적으로 3차원 탄성과 탐사가 활발하게 수행되고 있다(Ma *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2018). 또한 탐사지역의 이산화탄소 주입에 의한 지하 물성 변화를 파악하기 위하여 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 연구도 활발하게 수행되고 있다(Urosevic *et al.*, 2010; Whittaker *et al.*, 2011; Cheong and Kim, 2020).

4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기법을 적용하기 위해서는 이산화탄소 주입 전 기준 탐사자료(baseline data)와 주입 후 모니터링 탐사자료(monitored data)를 획득하는데, 모니터링 탐사는 이산화탄소 주입기간에 걸쳐 반복적으로 수행된다. 노르웨이의 Sleipner 프로젝트는 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기술이 가장 성공적으로 적용된 사례로, 해저 약 1,012 m에 위치한 염대수층에 이산화탄소를 주입하였다(Kongsjorden *et al.*, 1998; Chadwick *et al.*, 2009). 1994년에 3차원 기준 탐사가 수행되었으며, 1999년부터 2016년까지 주입기간에 반복적으로 모니터링 탐사가 수행되었다(Arts *et al.*, 2008; Furre *et al.*, 2017). 획득한 기준 탐사자료와 모니터링 탐사자료를 활용하여 4차원 시간경과 탄성과 모니터링을 수행하였으며, 탄성과 영상에 드러난 진폭 변화로부터 주입된 이산화탄소의 거동을 파악할 수 있었다(Arts *et al.*, 2008). 2000년에 시작된 캐나다의 Weyburn 프로젝트에서는 지하 약 1,450 m에 위치한 저류층에 이산화탄소를 주입하였다(Davis *et al.*, 2003). 기준 탐사는 1999년에 3차원 탄성과 탐사가 수행되었으며, 2001년부터 2007년까지 반복적인 모니터링 탐사가 수행되었다(White, 2009). 마찬가지로 4차원 시간경과 탄성과 모니터링을 수행하여 탐사자료로부터 탄성과 진폭 변화를 확인하였으며, 이산화탄소 주입에 의한 영향과 석유 생산으로 인한 영향 또한 확인되었다(White, 2009).

국내에서는 2013년부터 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 실증 프로젝트가 추진되었다. 2017년 초에 소규모 이산화탄소 시험 주입에 성공하였으며(Kwon, 2018), 2016년 하반기에 기준 탐사를 위한 3차원 해저면 탄성과 탐사가 수

행되었다(Park *et al.*, 2018). 그러나 2017년 11월에 리히터 규모 5.4의 포항지진이 발생하여 안전성 문제로 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트가 중단되었으며, 이에 따라 후속 연구인 모니터링 실증 단계는 수행되지 않았다.

따라서 이 연구에서는 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트에서 수행예정이었던 모니터링 시스템을 반영한 가상의 모니터링 수치예제를 통하여, 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기술의 국내 적용성을 검토하고자 한다. 3차원 탄성과 영상화 기술로는 정확성 측면에서 장점이 있는 주파수영역 역시간 구조보정을 이용하였으며, 이산화탄소 주입 후 각 모니터링 단계별 영상과 주입 전 영상의 차이를 계산하여 주입 이산화탄소의 거동 모니터링을 수행하고자 한다.

역시간 구조보정을 이용한 4차원 시간경과 탄성과 모니터링

4차원 시간경과 탄성과 모니터링

4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기술은 이산화탄소 주입 전-후로 획득한 3차원 탄성과 탐사자료로부터 구축한 탄성과 단면을 이용하여, 저장층 내의 이산화탄소 거동을 파악하는 기법이다. 시간경과 탄성과 모니터링은 잡음 수준 이상의 물성 변화가 감지될 수 있는지를 확인하는 감지가능성 분석 단계, 기준 탐사와 동일한 탐사의 반복성을 유지하기 위한 탐사설계 및 자료획득 단계, 동일한 영상화 알고리즘을 적용하여 각 탐사자료의 영상을 계산하는 자료처리 단계, 감지된 물성 변화에 대한 정량적 해석을 통해 원인을 규명하는 해석 및 분석 단계로 구분될 수 있다(Nam and Kim, 2011). 시간경과 탄성과 모니터링은 각 탄성과 탐사자료로부터 추정된 지하 영상단면의 차이를 계산하여, 이산화탄소 주입에 의한 변화를 추정하는 방법이며, 모니터링의 성공을 위해서는 탄성과 탐사를 동일한 조건에서 수행하고, 정확한 영상화 알고리즘을 선택하는 것이 중요하다.

4차원 시간경과 탄성과 모니터링을 위한 탄성과 탐사자료의 영상은 구조보정(migration) 기법과 같은 다양한 영상화 기법을 이용하여 얻을 수 있다. 3차원 구조보정 기법 중, 키르히호프 구조보정(Kirchhoff migration)은 경사진 지층에 대한 정확성과 계산량 측면에서 큰 장점이 있으나(Schneider, 1971; French, 1975), 다중 전파경로를 고려하지 못한다는 한계점(multipathing problem)이 있다(Gray *et al.*, 2001). 반면에 역시간 구조보정(reverse-time migration, RTM)은 파동방정식을 계산함으로써 반사면을 영상화하는 기술로(Hemon, 1978; Baysal *et al.*, 1983), 다른 구조보정 방법에 비해 많은 계산량이 요구되지만 가장 정확하게 지하 영상을 추정할 수 있다. 역시간 구조보정에서는 주어진 속도 모델에서의 수치모델링을 통해 각 지층의 반사도

에 따른 올바른 진폭을 구현할 수 있기 때문에(Vigh *et al.*, 2009), 주입 전-후의 진폭 변화를 정량적으로 해석해야 하는 시간경과 탄성과 모니터링에 적합한 영상화 기법이다. 최근 고성능 컴퓨터의 발전으로 3차원 역시간 구조보정 기술에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Huang *et al.*, 2011; Duan *et al.*, 2018). 4차원 시간경과 탄성과 모니터링에서도 역시간 구조보정 기법을 적용한다면, 역시간 구조보정 영상의 차이에서 드러나는 진폭 변화로부터 보다 정확한 이산화탄소의 거동을 감지할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 4차원 시간경과 탄성과 모니터링을 위한 역시간 구조보정 기술은 3차원 파동방정식의 수치모델링이 필요하기 때문에, 이산화탄소 지중저장 부지의 규모와 가용한 계산자원을 고려하여 역시간 구조보정 알고리즘의 적용성을 검토할 필요가 있다. 탐사영역이 너무 넓거나, 고주파수 신호의 모델링이 요구되어 모델 격자가 작아져야 할 경우 수치모델링에 오랜 시간이 소요되어 키르히호프 구조보정과 같이 계산량 측면에서 장점이 있는 구조보정 기술을 고려하는 것이 바람직하기 때문이다.

3차원 시간영역과 주파수영역 역시간 구조보정 기술은 각각의 장단점이 존재한다. 시간영역 역시간 구조보정 기술은 각 송신원 별로 모델링이 수행되기 때문에 수천 개 이상의 송신원을 다루는 3차원 탄성과 탐사에서는 다수의 송신원 자료를 병렬처리 할 수 있는 대규모의 클러스터가 요구된다. 또한 공간-시간에 대한 방대한 송신원 파동장을 저장하기 위한 기술이 요구되며(Nguyen and McMechan, 2015; Oh *et al.*, 2018), 이는 알고리즘의 정확성을 떨어뜨릴 수 있다. 반면에 3차원 주파수영역 역시간 구조보정 기술에서는 각 주파수 별로 모델링을 수행한 후, 송신원 별 파동장은 단순한 행렬곱에 의해 계산되기 때문에 다수의 송신원을 다루는 3차원 탐사자료에 대하여 장점이 크다. 또한 3차원 역시간 구조보정에 사용하는 주파수는(일반적으로 100개 이내) 송신원 수에 비해 적고, 각 주파수 별 모델링은 서로 독립적이기 때문에, 적은 수의 계산노드로도 주파수 별 병렬화를 통해 영상화 알고리즘의 성능을 개선할 수 있다. 하지만 주파수영역에서는 파동방정식을 행렬화하여 해를 계산해야 하므로, 대규모의 3차원 영역에서는 역행렬 계산에 요구되는 메모리가 단일노드의 메모리를 초과할 수 있기 때문에 적용이 불가능하다. 반면에 시간영역 역시간 구조보정은 영역분할법(domain decomposition)(Bohlen, 2002)과 같은 기술을 적용한다면, 수백 대 이상의 컴퓨터가 병렬 연결된 대규모 클러스터가 활용 가능한 환경일 경우 대규모의 3차원 부지에 대하여 보다 정밀한 영상화를 수행할 수 있다(Oh and Alkhalifah, 2019). 이처럼 시간영역과 주파수영역 3차원 역시간 구조보정 기술은 각각의 장단점이 존재하기 때문에, 탐사규모와 주어진 계산자원을 고려

하여 가장 효율적인 방법이 선택되어야 한다. 본 연구에서는 소규모 3차원 저장부지(1.2 km × 1 km × 1.25 km)에 대해 20개 코어로 구성된 단일노드 워크스테이션을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였기 때문에, 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘이 더 적합하다고 판단하였다.

3차원 주파수영역 역시간 구조보정

3차원 주파수영역 음향파동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$-\frac{\omega^2}{v_0(x)^2}\tilde{P}(x,\omega)=\nabla^2\tilde{P}(x,\omega)+\tilde{f}(x,\omega) \quad (1)$$

여기서 $\tilde{P}$ 는 주파수영역에서 압력파동장, ω 는 각주파수를 의미한다. v_0 는 기준 탐사자료를 통해서 예측된 P파의 속도, x 와 $\tilde{f}$ 는 각각 공간 벡터 및 탄성과 송신원 함수를 의미한다. 각주파수에 대하여 주파수영역 파동방정식을 행렬로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{S}\mathbf{p}=\mathbf{f} \quad (2)$$

여기서 행렬 $\mathbf{S}$ 는 임피던스(impedance) 행렬이며(Kim *et al.*, 2011), $\mathbf{p}$ 와 $\mathbf{f}$ 는 각각 주파수영역에서의 압력 파동장과 송신원 벡터를 의미한다. 모델링 행렬 $\mathbf{S}$ 는 공간 2차 정확도의 유한차분법(finite difference method, FDM)을 이용하여 구성되었으며, 식 (2)의 행렬식은 인텔사의 PARDISO (parallel direct sparse solver interface)(Parallel Direct Sparse Solver Interface, 2021)를 이용하여 계산되었다. 모델 경계에서의 반사파를 제거하기 위하여 PML(perfectly matched layer)(Bérenger, 1994) 기법을 적용하였다. 주파수영역에서 파동방정식의 해는 송신원 위치가 바뀔 때 모델링 행렬의 역행렬과 송신원 벡터의 곱으로 계산되기 때문에 단일노드 워크스테이션에서도 다수의 송신원을 사용하는 3차원 탄성과 탐사자료의 영상화가 가능하다. 또한 MPI(message passing interface)를 이용한 주파수 별 병렬화를 통하여 소규모의 클러스터에서 활용한다면 알고리즘의 성능을 향상시킬 수 있다.

역시간 구조보정에서 임의의 지점 i 에서의 영상화 조건(imaging condition, IC)은 식 (2)를 통해 계산된 송신원 파동장($\mathbf{p}$)과 수신기에서 역시간으로 전파하여 획득한 역전파된 파동장을 이용하여 식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$\text{IC}(x_i)=\sum_{\omega}^{\text{nf}}\frac{\sum_s^{\text{nshot}}\text{Re}[\mathbf{p}^T(\omega)\mathbf{b}(\omega)]}{\sum_s^{\text{nshot}}\mathbf{p}^T(\omega)\mathbf{p}(\omega)} \quad (3)$$

여기서 nf 와 nshot 은 각각 총 주파수 개수 및 총 송신원 개수를 의미하며, s 와 위 첨자 T 는 각각 송신원 번호와 벡터의 켈레 전치(conjugate transpose)를 의미한다. Re 는 복소수 값의 실수부분을 의미한다. 수신기 자료($\mathbf{d}$)로부터 역전파된 파동장($\mathbf{b}$)은 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{b}(\omega)=\mathbf{S}^T\mathbf{d}(\omega) \quad (4)$$

본 연구에서는 완전파형역산(full waveform inversion, FWI) 알고리즘을 기반으로 가상해시안 행렬(Shin *et al.*, 2001)을 이용하여 구면발산 효과를 보정해주는 영상화 조건을 이용하였으며, 임의의 지점 i 에서의 영상화 조건은 식 (5)와 같다.

$$\text{IC}(x_i)=\sum_{\omega}^{\text{nf}}\frac{\sum_s^{\text{nshot}}\text{Re}[\mathbf{f}_{v_i}^T(\omega)\mathbf{b}(\omega)]}{\sum_s^{\text{nshot}}\mathbf{f}_{v_i}^T(\omega)\mathbf{f}_{v_i}(\omega)} \quad (5)$$

이때, i 지점에서의 송신원 파동장으로 사용된 가상송신원(virtual source, $\mathbf{f}_{v_i}$)(Pratt *et al.*, 1998)은 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{f}_{v_i}(\omega)=-\left(\frac{\partial\mathbf{S}}{\partial v_i}\right)\mathbf{p}(\omega) \quad (6)$$

역시간 구조보정 기반의 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 과정을 Fig. 1에 도시하였다. 이산화탄소 주입 기간 동안 지구가 정적인 상태(static earth)이고, 탄성과 탐사가 이상적으로 동일하게 수행된다고 가정하면, 구조보정 영상에서 나타나는 변화는 주입 이산화탄소에 의해 유발된 것이다. 주입된 이산화탄소에 의해 지층의 탄성과 속도가 감소하고, 이로 인하여 주입 이후에 해당 지층 경계면에서의 반사계수가 커지기 때문에, 구조보정 영상에서 나타나는 진폭 변화가 커지게 된다. 따라서 역시간 구조보정을 기반으로 한 4차원 시간경과 탄성과 모니터링에서는 기준 탐사자료($\mathbf{d}_0$)와 각 모니터링 탐사자료($\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3$ 등)의 역전파된 파동장을 계산하여, 식 (5)을 통해 구조보정 영상(IC₀, IC₁, IC₂, IC₃ 등)을 계산할 수 있으며, (IC₁ - IC₀), (IC₂ - IC₀), (IC₃ - IC₀)을 계산하여 각 모니터링 단계별 지층의 진폭 변화를 추정함으로써 주입된 이산화탄소의 거동을 모니터링 할 수 있다(Fig. 1).

Fig. 1. Schematic diagram illustrating the workflow of 4D time-lapse seismic monitoring based on reverse-time migration.

이산화탄소 주입 모델 구축

연구지역

본 연구에서는 주파수영역 역사간 구조보정 기반의 4차원 시간경과 탄성파 모니터링 기술의 소규모 이산화탄소 지중저장 부지에 대한 적용성을 검증하기 위하여, 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트에 적용 예정이었던 모니터링 시스템을 반영한 가상의 모니터링을 수행하고자 한다. 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트(Fig. 2)의 3차원 기준 탐사자료는 2016년 3월에 한국지질자원연구원의 물리탐사선 탐해 2호를 이용하여 주입지점에서 북동측으로 350 m 떨어진 400 m × 350 m 장방형 해역에서 획득되

었으며, 40개의 Hydro-Geophone OBS (Ocean-Bottom Sensor) 수신 시스템과 269 inch³의 에어건 송신원이 이용되었다(Shinn *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2018). 스트리머 1개당 Hydro-Geophone OBS 8개를 약 50 m 간격으로 설치하였으며, OBS 배열 스트리머는 100 m 간격으로 배치되었다. 적은 수의 수신기를 사용하였기 때문에 에어건 송신원 발파 횟수(1,104번)를 늘려 획득 자료의 양을 늘리고자 하였으며, 송신원은 OBS 설치 면적의 9배인 1.2 km × 1.05 km 면적에 대하여 25 m 간격으로 발파되었다(Fig. 2). 동일한 방식으로 3차원 탐사를 반복적으로 수행하여 주입 후 모니터링을 수행할 계획이었지만, 2017년 포항지진으로 인하여 프로젝트가 중단되면서 모니터링 탐사가 수행되지 않았

Fig. 2. Location map of the survey area (modified from Song *et al.*, 2015) and 3D seismic survey acquisition geometries with three different monitoring systems (Case-I, Case-II, Case-III). In Case-I, which was used for the real 3D baseline survey in 2016, 40 ocean-bottom receivers are installed with 4C receivers. In Case-II, which was planned for monitoring surveys in the Pohang CCS demonstration project, 56 ocean-bottom receivers are installed with 4C receivers and additional 2C receivers (filled black circles). In Case-III, which is for a future extended monitoring survey, 100 ocean-bottom receivers are uniformly installed on the sea bottom. The blue line is the source line chosen to visualize CRGs in Fig. 5. Among the 40 receivers in Case-I, the common receivers in Stage-I, Stage-II, and Stage-III (also the baseline) are colored in yellow, orange, and red, respectively.

다. 따라서 본 연구에서는 가상의 주입 시나리오를 가정하여, 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트 모니터링 시스템을 이용한 인공합성 탄성과 탐사자료를 획득하고 역시간 구조보정 기반의 4차원 시간경과 탄성파 모니터링 기술의 적용성을 검토하고자 한다.

이산화탄소 주입모델

경북 영일군에 위치하는 포항분지(Fig. 2)는 제3기 마이오세 퇴적분지로 분지 내부에 정단층이 다수 존재하는 지역이다(Woo *et al.*, 2003). 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 부지의 저장층은 공극률이 우수한 역암 및 사암층이며, 상부에는 덮개암 역할을 하는 두꺼운 이암층이 존재하며, 분지 확장과정에서 형성된 정단층과 다수의 퇴적동시성 정단층이 존재하는 것으로 보고된 바 있다(Song *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2017). 가상의 주입 시나리오를 가정하기 위해서는 연구지역에 대한 3차원 속도 모델이 필요하지만, 아직 탐사지역에 대한 정밀한 3차원 속도 모델이 구축되어 있지 않았기 때문에, 연구지역과 지질학적으로 유사하면서 이산화탄소 저장에 용이한 저장구조를 가지는 볼브 유전지역

의 3차원 속도 모델을 활용하였다(Equinor 제공). 볼브 유전지역은 다수의 정단층들로 둘러싸인 그라벤(Graben) 구조이며, 공극률이 큰 사암으로 이루어진 저류층 위로 치밀하고 두꺼운 이암층이 존재한다. 연구지역에 맞게 축소된 볼브 유전지역의 속도 모델, 기존에 계획했던 40개의 수신 시스템(Case-I in Fig. 2)을 가정하여 획득한 인공합성 기준 탐사자료, 역시간 구조보정 영상화 결과는 Fig. 3과 같다. 볼브 유전지역의 속도 모델(Fig. 3(a))은 주입 저장층의 깊이와 저장층 및 덮개암의 구조가 연구지역과 유사하여(Shinn *et al.*, 2018) 시간경과 탄성파 모니터링 기술 검증에 위한 가상의 시나리오 작성에 적합할 것으로 판단하였다.

저장층에 이산화탄소를 주입하면 기존에 존재하였던 지층 내 공극수가 유압에 의해 밀려나고 이산화탄소가 채워지는데, 이때 이산화탄소는 주변 공극수보다 가벼워 지층 내에서 위로 이동하려는 특성을 갖는다. 이로 인하여 주입된 이산화탄소는 저장층 내의 상부 공간부터 채워지며, 이산화탄소가 채워진 영역은 P파의 속도가 감소한다. 이산화탄소 주입 단계는 Fig. 4와 같이 총 3차로 설정하였다. 주입 이산화탄소에 의한 P파 속도의 감소는 가스만 방정식

Fig. 3. (a) P-wave velocity model before injection and (b) RTM result using the baseline data with 40 receivers (Case-I). (c) CRG of the baseline data. The receiver location corresponds to the red circle in Fig. 2. The blue rectangle indicates a part of the CRG to show the differences from the modeling data in Fig. 5.

(Gassmann's equation)(Gassmann, 1951)을 통해 추정할 수 있다(Wang *et al.*, 1998). 그러나 인공합성 모니터링 탐사자료를 획득할 때 사용된 속도 모델이 영일만 지역의 실제 속도와 다르기 때문에, 연구지역에서 이산화탄소 주입에 따른 유의미한 속도 감소율을 반영하기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 각 모니터링 단계별로 이산화탄소가 저장된 지역에 대해서 임의로 6%의 P파 속도 감소율을 가정

하였으며, 이는 P파 속도가 약 4 km/s, 공극률이 약 10%인 저장층이 이산화탄소가 100% 포화되었을 경우의 감소율에 해당한다(Vera, 2012). 향후 국내 이산화탄소 지중저장 실증지에 대한 모니터링에서는 지중저장 부지의 물성정보를 바탕으로 저장층의 속도, 공극률, 이산화탄소 포화도 등을 고려하여 결정되어야 한다.

Fig. 4. P-wave velocity models after injection (a), (c), and (e) and their velocity differences (b), (d), and (f) with baseline model (Fig. 3a) on Stage-I (a) and (b), Stage-II (c) and (d), and Stage-III (e) and (f).

역시간 구조보정 기반의 4차원 시간경과 탄성파 모니터링 적용

가상의 주입 시나리오에 따라, 주파수영역 수치모델링을 이용하여 인공합성 기준 탐사자료(Fig. 3(c))와 3번의 인공합성 모니터링 탐사자료(Fig. 5(a), 5(b), 5(c))를 획득하였다. 모니터링 탐사자료와 기준 탐사자료의 차이에서 주입 이산화탄소에 의한 반사파를 확인할 수 있다. 가상의 모니터링 탐사에서 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트의 모니터링 시스템을 반영하여, 총 40개의 수신기와 총 1,104번의 송신원 발파 수가 기준 탐사와 동일하게 사용되었다(Case-I in Fig. 2).

역시간 구조보정 수행에 사용된 입력 변수들은 Table 1에 나열하였으며, 이는 인공합성 탐사자료를 획득하기 위해 수치모델링에서 사용한 변수와 동일하다. 수치예제를 수행하기 위한 모델 크기는 수평방향 1.2 km, 수직방향 1 km, 탐사심도 1.25 km이다. 모델링에서 사용한 모델 격자 간격은 12.5 m로 설정하였으며 송신원은 해수면에, OBS의 수심은 12.5 m로 설정하였다. 탐사자료의 총 기록 시간은 5 초이며, 시간간격은 0.004 초이다. 송신원 파형은 최대주파수가 30 Hz인 1차미분 가우스 함수(first derivative of Gaussian function)를 사용하였다. 역시간 구조보정에 사용된 탐사자료의 주파수 대역은 5~30 Hz이며, 주파수 간격은 0.2 Hz 이다. 구조보정을 위한 속도 모델은 파형역산이

Fig. 5. CRGs for one shot line (a), (b), and (c) and their differences (d), (e), and (f) with baseline data (Fig. 3c) on Stage-I (a) and (d), Stage-II (b) and (e), and Stage-III (c) and (f). The source line and the locations of common receivers are shown in Fig. 2 (CRG geometry).

Table 1. Modeling parameters for generating synthetic monitoring data and conducting RTM

Parameter	Value
Survey area	Inline 1.2 km
	Crossline 1 km
	Depth 1.25 km
Grid sampling	12.5 m
Recording time	5 s
Time sampling	0.004 s
Number of sources	1,104
Number of receivers	40
Source wavelet	The first derivative of Gaussian function
Frequency range	5 ~ 30 Hz
Frequency interval	0.2 Hz

나 토모그래피를 통해 장파장 속도 구조를 추정했다는 가정 하에, SU(Seismic Unix)(Center for Wave Phenomena, 2021)에 포함된 smooth3d를 이용하여 주입 전 속도 모델(Fig. 3(a))에 대해 각 방향으로 평활화 거리를 10으로 적용하여 계산하였다. 실제 모니터링 탐사자료로부터 각 주입시기별 속도 모델을 추정하는 것은 탐사자료의 비반복성에 의한 속도의 오차를 유발할 수 있기 때문에, 기준 탐사자료로부터 속도 모델을 추정했다는 가정 하에 각 모니터링 탐사자료의 구조보정에서도 동일한 속도 모델을 사용하였다.

기준 탐사모델인 Fig. 3(a)에 대하여 수치모델링을 통해 획득한 인공합성 기준 탐사자료의 공통 수신기 모음(Com-

mon Receiver Gather, CRG)은 Fig. 3(c)와 같다. 인공합성 기준 탐사자료(Fig. 3(c))를 이용한 3차원 역시간 구조보정을 수행한 영상화 결과는 Fig. 3(b)와 같다. 고주파수의 신호를 모델링하기 위해서는 수치분산을 피하기 위하여 더 작은 격자를 사용해야 하기 때문에, 모델링 행렬(S)이 커져 역행렬 계산에 필요한 메모리 요구량이 증가한다. 따라서 주파수영역 3차원 모델링에서 사용할 수 있는 주파수 대역이 낮아 역시간 구조보정 영상의 분해능을 더 이상 높이기 어려웠다. Fig. 5는 각 모니터링 단계별로 획득한 탐사자료(Fig. 5(a), 5(b) and 5(c))와 기준 탐사자료와의 차이(Fig. 5(d), 5(e) and 5(f))를 보여준다. 각 모니터링 단계별 탐사자료(Fig. 5)에 대하여 역시간 구조보정 영상을 구한 후 기준 탐사자료의 영상(Fig. 3(b))과의 차이를 계산한 결과(Fig. 6(a), 6(c) and 6(e)), 주입 이산화탄소에 의한 속도 변화(Fig. 4(b), 4(d) and 4(f))로 야기되는 구조보정 영상의 수평적인 진폭 변화가 잘 감지되는 것을 확인하였다. 수직적인 진폭 변화도 감지가 되었지만 저장층 내에서의 다중반사파에 의해 저장층 하부에도 진폭 변화가 감지되기 때문에, 정확한 깊이를 추정하기에는 어려움이 있는 것으로 보인다. 또한 수신기 수가 제한되어 탐사지역 중앙에 몰려있기 때문에, 모델 외곽 부분에서의 변화는 반사파 신호가 기록되기 어려워 진폭 변화가 잘 감지되지 않았다. 이러한 한계점을 예상했기 때문에, 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 프로젝트에서는 기준 탐사에 활용한 40개의 4성분 수신기 외에 16개의 2성분 수신기를 추가하여 모니터링 탐사를 수행할 계획이었다(Kwon, 2018). 따라서 본 연구에서는 개선된 모니터링 시스템을 반영하여(Case-II in Fig. 2), 수신기 2줄을 추가한 총 56개의 수신기를 사용하여 가상의 모

Fig. 6. 4D time-lapse monitoring results, showing the difference between monitoring RTM image and baseline RTM image (Fig. 3b), using the monitoring systems Case-I (a), (c), and (e) and Case-II (b), (d), and (f) on injection Stage-I (a) and (b), Stage-II (c) and (d), and Stage-III (e) and (f). The receiver locations in Case-I (40 receivers) and Case-II (56 receivers) are shown in the xy -plane in (a) and (b).

Fig. 6. 4D time-lapse monitoring results, showing the difference between monitoring RTM image and baseline RTM image (Fig. 3b), using the monitoring systems Case-I (a), (c), and (e) and Case-II (b), (d), and (f) on injection Stage-I (a) and (b), Stage-II (c) and (d), and Stage-III (e) and (f). The receiver locations in Case-I (40 receivers) and Case-II (56 receivers) are shown in the xy -plane in (a) and (b) (Continued).

Fig. 7. 4D time-lapse monitoring results, showing the difference between monitoring RTM image and baseline RTM image (Fig. 3b), using the monitoring system Case-III on (a) Stage-I, (b) Stage-II, and (c) Stage-III. The receiver locations in Case-III (100 receivers) are shown in the xy -plane in (a).

Fig. 7. 4D time-lapse monitoring results, showing the difference between monitoring RTM image and baseline RTM image (Fig. 3b), using the monitoring system Case-III on (a) Stage-I, (b) Stage-II, and (c) Stage-III. The receiver locations in Case-III (100 receivers) are shown in the xy -plane in (a) (Continued).

니터링을 수행하였다(Fig. 6(b), 6(d) and 6(f)). 주입점과 가까운 남서쪽 부근의 영상이 다소 개선되는 것을 확인하였으나, 본 연구에서 역시간 구조보정에 사용한 주파수 대역(5~30 Hz)에서는 큰 차이점을 확인하기 어려웠다. 최종적으로 100개의 수신기를 탐사지역에 균등하게 분포시켜 모니터링을 수행한 결과(Case-III in Fig. 2), 모델 외곽 부분에서의 수평적인 감지 가능성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 7). 하지만 40개의 수신기만을 사용했을 경우에도, 모델 중앙부에서의 이산화탄소의 전반적인 거동을 모니터링 하는 데에 큰 문제점은 없는 것으로 판단되었다.

결 론

본 연구에서는 포항 영일만에서 이산화탄소 지중저장 부지에서 계획되었던 모니터링 시스템을 가정하여, 역시간 구조보정 기반의 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기술의 적용성을 검토하고자 하였다. 3차원 탄성과 영상화 알고리즘으로는 다수의 송신원 자료를 영상화하는 데 유리한 주파수영역 3차원 역시간 구조보정 기술이 적용되었으며, 이산화탄소 주입 전 기준 탐사모델과 주입 후 모니터링 탐사모델을 구축한 뒤 수치모델링을 통하여 인공합성 모니터링 자료를 획득하였다. 수치예제에 사용된 탐사조건은 기존의 포항 영일만 3차원 탄성과 탐사에 사용된 송신원과 수신기의 위치를 이용하였으며, 기존의 탐사조건보다 수신기의 개수를 늘린 개선된 탐사조건을 사용한 경우와 비교하였다. 기존의 탐사조건을 사용한 경우, 수치모델링을 통해 획득한 공통 수신기 모음과 역시간 구조보정을 이용한 모니터링 결과로부터 이산화탄소 주입에 의한 수평적인 변화

가 감지되었다. 개선된 탐사조건을 사용한 경우에는 수신기를 56개와 100개를 각각 배치하였으며, 100개의 수신기를 배치한 경우에는 탐사영역의 외곽까지 수평적인 변화가 감지된 것을 확인하였다. 기존의 탐사조건을 사용한 경우의 모니터링 결과는 개선된 탐사조건을 사용한 모니터링 결과와 유사한 진폭 변화 양상을 확인하였으며, 국내 포항 영일만 이산화탄소 지중저장 부지에서 수행될 예정이었던 소규모 4차원 시간경과 탄성과 모니터링 기술의 적용가능성을 확인하였다. 실제 3차원 탄성과 탐사에서 사용되는 수신기의 개수를 보다 늘린다면 개선된 모니터링 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 실제 이산화탄소 지중저장 부지에서 수행되는 모니터링 탐사는 주입 기간에 걸쳐 반복적으로 수행되기 때문에 송신원 파형의 변화, 송신원 및 수신기 위치의 오차, 배정잡음 등에 의한 비반복성(non-repeatability) 요소가 발생할 수밖에 없다. 본 연구에서는 인공합성 탐사자료를 사용하여 수치모델링에 사용되는 P파 속도의 작은 변화로도 진폭 변화를 탐지할 수 있으나, 현장 탐사자료에 존재하는 비반복성 요소에 의한 영향이 진폭 변화보다 클 경우에는 이산화탄소 주입에 의한 진폭 변화 탐지에 어려움이 있다. 그러므로 본 연구의 시간경과 탄성과 모니터링 기술을 현장에서 획득된 모니터링 자료에 적용할 경우에는 비반복성 요소에 의한 영향을 줄이기 위한 다양한 방법들이 요구된다. 탐사자료를 영위상 자료(zero phase)로 변환하여 자료처리 과정을 수행하면 진폭 스펙트럼 영향을 줄여 송신원 파형 변화에 의한 영향을 최소화시킬 수 있으며, 탐사자료에 라돈 필터(Radon filter) 등의 전처리(pre-processing) 기법을 적용하면 겹반사(multiple)와 같은 잡음의 영향을 최소화시킬 수 있다(Nam and

Kim, 2011). 비반복성 요소는 이 외에도 현장에서 수행되는 탐사환경에 따라 다양하므로, 현장에서 자료 취득 시 탄성파 탐사를 가능한 동일하게 수행하는 것이 중요하며, 이에 실패하였을 경우를 대비하여 각 비반복성 요소의 영향을 최소화시킬 수 있도록 4차원 시간경과 탄성파 모니터링 알고리즘을 개선하는 후속연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 해저면 수신기에서 기록된 압력 성분만을 가정하여, 음향파동방정식을 사용하여 모니터링을 수행하였으나, P파와 S파가 모두 기록되는 변위 성분을 이용하여 탄성파동방정식 기반의 역시간 구조보정을 적용한다면 모니터링의 정확도가 향상될 가능성이 있다.

본 연구에서 제안된 주파수영역 역시간 구조보정 기반의 4차원 시간경과 탄성파 모니터링 기술은 추후 국내 이산화탄소 지중저장 부지에서 모니터링 탐사가 수행될 때 적용되어, 이산화탄소 지중저장 기술의 안전성에 대한 우려를 완화시키고 사회적 수용성을 확보하는 데 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2019년과 2020년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2019K1A3A1A80113341, NRF-2020R1I1A3073977). 또한 국토교통과학기술진흥원의 쇄퇴지역 재생역량 강화를 위한 기술개발사업인 “쇄퇴지역의 도시공간 위험성 분석 및 도시회복력 향상을 위한 기술개발”의 지원(과제번호: 19TSRD-B151228-01)과 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20162010201980). 볼브 유전 지역의 3차원 속도 모델을 제공해주신 Equinor에 감사드립니다.

References

- Arts, R., Chadwick, A., Eiken, O., Thibeu, S. and Nooner, S., 2008. Ten years' experience of monitoring CO₂ injection in the Utsira Sand at Sleipner, offshore Norway, *First Break*, 26(1), p.65-72.
- Baysal, E., Kosloff, D.D. and Sherwood, J.W.C., 1983. Reverse time migration, *Geophysics*, 48(11), p.1514-1524.
- Béranger, J.P., 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics*, 114(2), p.185-200.
- Bohlen, T., 2002. Parallel 3-D viscoelastic finite difference seismic modelling, *Computers & Geosciences*, 28(8), p.887-899.
- Center for Wave Phenomena, 2021.09.02, <https://cwp.mines.edu/software/>
- Chadwick, R.A., Noy, D., Arts, R. and Eiken, O., 2009. Latest time-lapse seismic data from Sleipner yield new insights into CO₂ plume development, *Energy Procedia*, 14(1), p.2103-2110.
- Cheong, S. and Kim, B.-Y., 2020. Time-lapse Seismic Monitoring Technique for the Otway Site, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(1), p.35-44.
- Choi, B.-Y., Shinn, Y.-J., Park, Y.-C., Park, J., Kwon, Y.-K. and Kim, K.-Y., 2017. Simulation of CO₂ injection in a small-scale pilot site in the Pohang Basin, Korea: Effect of dissolution rate of chlorite on mineral trapping, *International Journal Greenhouse Gas Control*, 59, p.1-12.
- Davis, T.L., Terrell, M.J., Benson, R.D., Cardona, R., Kendall, R.R. and Winarsky, R., 2003. Multicomponent seismic characterization and monitoring of the CO₂ flood at Weyburn Field, Saskatchewan, *The Leading Edge*, 22(7), p.696-697.
- Duan, P., Gu, B., and Li, Z., 2018. An Efficient 3D Reverse Time Migration in Vertical Time Domain Based on Optimal Operator Boundary Storage Strategy, *SEG International Exposition and 88th Annual Meeting*, Anaheim, U.S.A, North America, p.4271-4275.
- French, W.S., 1975. Computer migration of oblique seismic reflection profiles, *Geophysics*, 40(6), p.961-980.
- 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, p.3916-3926.
- Gassmann, F., 1951. , Über die Elastizität poröser Medien, *Veierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich*, 96, p.1-23.
- Gray, S.H., Etgen, J., Dellinger, J. and Whitmore, D., 2001. Seismic migration problems and solutions, *Geophysics*, 66(5), p.1622-1640.
- Grigoli, F., Cesca, S., Rinaldi, A.P., Manconi, A., López-Comino, J.A., Clinton, J.F., Westaway, R., Cauzzi, C., Dahm, T. and Wiemer, S., 2018. The November 2017 M_w 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea, *Science*, 360(6392), p.1003-1006.
- Hemon, C., 1978. Equations d'onde et modeles, *Geophysical Prospecting*, 26(4), p.790-821.
- Huang, Y., Bai, B., Quan, H., Huang, T., Xu, S., and Zhang, Y., 2011. Application of RTM 3D angle gathers to wide-azimuth data subsalt imaging, *Geophysics*, 76(5), p.WB175-WB182.
- Iding, M. and Ringrose, P., 2009. Evaluating the impact of fractures on the long-term performance of the In Salah CO₂ storage site, *Energy Procedia*, 1(1), p.2021-2028.
- IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5°C*, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R.,

- Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. and Waterfield T. Eds., p.1-630.
- Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y.H., Kim, S., Kang, S.Y. and Seo, W., 2018. Assessing whether the 2017 M_w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event, *Science*, 360(6392), p.1007-1009.
- Kim, Y., Min, D.-J. and Shin, C., 2011. Frequency-domain reverse-time migration with source estimation, *Geophysics*, 76(2), p.S41-S49.
- Kongsjorden, H., Kårstad, O. and Torp, T.A., 1998. Saline aquifer storage of carbon dioxide in the Sleipner project, *Waste Management*, 17(5-6), p.303-308.
- Kwon, Y. K., 2018. Demonstration-scale offshore CO₂ storage project in the Pohang Basin, Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 28(2), p.133-160.
- Ma, J., Wang, X., Gao, R., Zhang, X., Wang, Z., Wei, Y., Ma, J., Zhao, X., Huang, C., Jiang, S., Li, L., Yu, H. and Wang, H., 2017. Jingbian CCS project in China: 2015 update, *Energy Procedia*, 114, p.5768-5782.
- Mayer, B., Shevalier, M., Nightingale, M., Kwon, J.S., Johnson, G., Raistrick, M., Hutcheon, I. and Perkins, E., 2013. Tracing the movement and the fate of injected CO₂ at the IEA GHG Weyburn-Midale CO₂ Monitoring and Storage project (Saskatchewan, Canada) using carbon isotope ratios, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 16, p.S177-S184.
- Nam, M.J. and Kim, W., 2011. An introduction to time-lapse seismic reservoir monitoring, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 14(3), p.203-213.
- Nguyen, B.D. and McMechan, G.A., 2015. Five ways to avoid storing source wavefield snapshots in 2D elastic prestack reverse time migration, *Geophysics*, 80(1), p.S1-S18.
- Oh, J.-W. and Alkhalifah, T., 2019. Study on the full-waveform inversion strategy for 3D elastic orthorhombic anisotropic media: application to ocean bottom cable data, *Geophysical Prospecting*, 67(5), p.1219-1242.
- Oh, J.-W., Kalita, M. and Alkhalifah, T., 2018. 3D elastic full-waveform inversion using P-wave excitation amplitude: Application to ocean bottom cable field data, *Geophysics*, 83(2), p.1MA-Z8.
- Parallel Direct Sparse Solver Interface, 2021.09.02., <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/documentation/onemkl-developer-reference-c/top/sparse-solver-routines/onemkl-pardiso-parallel-direct-sparse-solver-interface.html>
- Park, M.-H., Lee, C.S., Kim, B.-Y., Kim, J.-H., Kim, K.J. and Shinn, Y.J., 2018. Preliminary results of the pre-injection monitoring survey at an offshore CO₂ injection site in the Yeongil Bay, *The Journal of Engineering Geology*, 28(2), p.247-258.
- Park, Y.-C., Lee, C., Seo, Y.-J. and Cheong, S., 2016. CO₂ monitoring in stage 2C of CO₂CRC Otway project, *Journal of the Korean Society Mineral and Energy Resources Engineers*, 53(5), p.511-522.
- Pratt, R.G., Shin, C. and Hicks, G.J., 1998. Gauss-Newton and full Newton methods in frequency-space seismic waveform inversion, *Geophysical Journal International*, 133, p.341-362.
- Ringrose, P.S., Mathieson, A.S., Wright, I.W., Selama, F., Hansen, O., Bissell, R., Saoula, N. and Midgley, J., 2013. The In Salah CO₂ storage project: lessons learned and knowledge transfer, *Energy Procedia*, 37, p.6226-6236.
- Schilling, F., Borm, G., Würdemann, H., Möller, F., Kühn, M. and CO₂ SINK Group, 2009. Status Report on the First European on-shore CO₂ Storage Site at Ketzin (Germany), *Energy Procedia*, 1(1), p.2029-2035.
- Schneider, W.A., 1971. Developments in seismic data processing and analysis (1968-1970), *Geophysics*, 36(6), p.1043-1073.
- Shin, C., Jang, S. and Min, D.-J., 2001. Improved amplitude preservation for prestack depth migration by inverse scattering theory, *Geophysical Prospecting*, 49(5), p.592-606.
- Shinn, Y.J., Kwon, Y.K., Yoon, J.-R., Kim, B.-Y. and Cheong, S., 2018. Result of CO₂ geological storage site survey for small-scale demonstration in Pohang Basin, Yeongil Bay, SE Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 28(2), p.161-174.
- Song, C.W., Son, M., Sohn, Y.K., Han, R., Shinn, Y.J. and Kim, J.-C., 2015. A study on potential geologic facility sites for carbon dioxide storage in the Miocene Pohang Basin, SE Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(1), p.53-66.
- Stork, A.L., Verdon, J.P. and Kendall, J.-M., 2015. The micro-seismic response at the In Salah Carbon Capture and Storage (CCS) site, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 32, p.159-171.
- Torp, T.A. and Gale, J., 2004. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects, *Energy*, 29(9-10), p.1361-1369.
- Urosevic, M., Pevzner, R., Kepic, A., Wisman, P., Shulakova, V. and Sharma, S., 2010. Time-lapse seismic monitoring of CO₂ injection into a depleted gas reservoir - Naylor Field Australia, *The Leading Edge*, 29(2), p.164-169.
- Vera, V.C., 2012. *Seismic modeling of CO₂ in a sandstone aquifer, Priddis, Alberta*, master thesis, University of Calgary, Calgary, AB, p.1-127.
- Vigh, D., Starr, E.W. and Kapoor, J., 2009. The role of reverse time migration in complex imaging, *Canadian Society of Exploration Geophysicists*, 34(6), p.20-24.

- Wang, Z., Cates, M.E. and Langan, R.T., 1998. Seismic monitoring of a CO₂ flood in a carbonate reservoir: A rock physics study, *Geophysics*, 63(5), p.1604-1617.
- White, D., 2009. Monitoring CO₂ storage during EOR at the Weyburn-Midale field, *The Leading Edge*, 28(7), p.838-842.
- Whittaker, S., and Gilboy, C., 2003. IEA Weyburn CO₂ monitoring and storage project: Geoscience framework update, *Summary of investigations 2003*, Volume 1, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Industry Resources, Misc. Rep. 2003-4.1, CD-ROM, Paper A-7, 9p.

- Whittaker, S., Rostron, B., Hawkes, C., Gardner, C., White, J., Johnson, J., Chalaturnyk, R. and Seeburger, D., 2011. A decade of CO₂ injection into depleting oil fields: monitoring and research activities of the IEA GHG Weyburn-Midale CO₂ Monitoring and Storage Project, *Energy Procedia*, 4, p.6069-6076.
- Woo, K.S., Noh, J.H., and Park, K.-H., 2003. The origin of the carbonate concretions in the Yeonil Group, Pohang Basin, *Journal of the Geological Society of Korea*, 39(1), 1-24.

박 세 은

2021년 전북대학교 공과대학 자원·에너지 공학과 공학사

현재 전북대학교 환경에너지융합학과 석사과정
(E-mail; world263@naver.com)

김 대 식

2021년 전북대학교 공과대학 자원·에너지 공학과 공학사

현재 전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정
(E-mail; white3529@naver.com)

오 주 원

현재 전북대학교 자원·에너지공학과 조교수
(本學會誌 第57卷 第1号 参照)

김 병 엽

1998년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2000년 한양대학교 대학원 자원공학과 공학석사
2012년 한양대학교 대학원 지구환경시스템 공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 해저지질탐사연구센터장
(E-mail; bykim@kigam.re.kr)

민 동 주

1993년 서울대학교 사범대학 지구과학과 육과 이학사
1995년 서울대학교 사범대학 과학교육과 교육학석사
1999년 서울대학교 사범대학 과학교육과 교육학박사

현재 서울대학교 에너지자원공학과 교수
(E-mail; spoppy@snu.ac.kr)