연구논문

슬라이프너 4D 자료를 이용한 탄성파 모니터링 자료처리 방법론에 대한 시험

정순홍^{1*} · 김병엽² · 박권규³ · 박용찬¹ · 김도경⁴ · 김형태⁴¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부 책임연구원, ²한국지질자원연구원 석유해저연구본부 본부장,³한국지질자원연구원 석유해저연구본부 연구단장, ⁴한국지질자원연구원 석유해저연구본부 인턴연구원

Test Processing of Seismic Monitoring using Sleipner 4D Data

Snons Cheong^{1*}, Byoung-Yeop Kim², Kwon Gyu Park³, Yong-Chan Park¹, Do Kyoung Kim⁴ and Hyeong-Tae Kim⁴¹Principal Researcher, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea²Division Director, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea³Center Supervisor, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea⁴Intern Researcher, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea***Corresponding Author.** Snons Cheong, snons@kigam.re.kr, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea

Received

23 November 2021

Final version Received

11 January 2022

Accepted

22 February 2022

Abstract

To verify the potential of time-lapse seismic monitoring for the Korean domestic CCS project, we analyzed the Sleipner project dataset. Time-lapse data used for input consists of the baseline and monitoring data that were recorded in 1994 and 2008, respectively. The difference between the baseline and the monitoring data, subsurface CO₂ plume, was clearly identified as a change in the seismic amplitude. To investigate the effect of time-lapse processing, we tested input parameters of time-varying amplitude gain and lateral smoothing modules. The result shows that gain should be applied on the entire traces, and smoothing can increase the signal to noise ratio. By comparing the derived amplitude difference with the results of the previous paper in the Sleipner project, it was confirmed that the CO₂ plume region was consistent. The accumulated experience of the Sleipner data will be embodied in a best framework to assist future CO₂ storage project in Korea.

Key words : time-lapse seismic monitoring, Sleipner project, CO₂ storage

요약

시간경과 탄성파 모니터링 기법의 국내 활용 가능성을 확인하기 위하여, 슬라이프너 CCS 프로젝트의 탐사자료에 적용하고 분석하였다. 입력에 활용한 탄성파 4D 자료는 1994년 취득된 기준 자료와 2008년 취득된 모니터링 자료로 구성된다. 기준 자료와 모니터링 자료의 차이를 계산한 결과 지하에 주입된 이산화탄소의 부존 영역이 탄성파 진폭 변화로 뚜렷하게 확인되었다. 4D 처리 모듈 중 시간 변화 진폭 회수와 평활화 모듈의 입력 매개변수를 시험하고 진폭 변화에 미치는 결과를 확인하였다. 진폭 회수는 전체 트레이스에 대하여 적용하여 진폭 변화의 가시성을 높일 수 있으며, 평활화 모듈은 신호 대 잡음 비를 향상시켰다. 도출된 진폭 변화를 슬라이프너 프로젝트에서 발표된

결과와 비교하여, 이산화탄소 부존 영역이 일치함을 확인하였다. 슬라이프너 CCS프로젝트의 탐사자료처리 방법론 시험 경험은 향후 국내 이산화탄소 지중저장 연구 및 실증화 성공을 위한 탄성과 4D 모니터링 기술 정립의 기틀이 될 것으로 기대된다.

주요어: 시간경과 탄성과 모니터링, 슬라이프너 프로젝트, 이산화탄소 지중저장

서 론

시간경과 탄성과 모니터링 기술은 지하 심부의 유체 부존 또는 그로 인한 물성 변화를 탄성과 탐사를 활용하여 간접적으로 탐지하는 방법이다(Lumley, 2001; Chadwick *et al.*, 2010; Nam and Kim, 2011). 지하 입체 지층 구조의 3차원 공간의 특성을 추가적인 차원인 시간경과에 대하여 분석하므로 통상 4차원 탄성과 탐사 기술로 지칭한다(Landro *et al.*, 1999; Lumley, 2010). 4D 탄성과 모니터링의 적용은 특정 지역에서 3D 탐사자료를 시간경과에 따라 반복 취득하고, 특정 시기별 취득된 자료들의 진폭 또는 속성의 차이를 계산하여 수행된다(Landro, 2015). 이와 같은 4D 탄성과 모니터링은 다음과 같은 이유로 매우 어렵다. 첫 번째로, 지층 내부의 유체로 인한 물성 변화가 탄성과 신호의 변화로 구별되는 대상층(target layer)이 존재하여야 한다. 두 번째로, 기준 탐사(baseline survey)와 모니터링 탐사(monitoring survey)가 고해상도 3차원 탐사로 취득되어야 하며, 마지막으로, 취득된 입력 자료들이 대상층의 물성 변화를 정확히 반영하도록 복잡한 자료처리가 동일한 품질로 반복 수행되어야 한다.

기술적인 어려움에도 불구하고 4D 탄성과 기술이 필요한 이유는 지하 심부의 물성 변화를 간접적으로 도출할 수 있기 때문이다. 특히 최근 탄성과 모니터링은 종래의 석유가스 회수 증진(Enhanced Oil Recovery) 영역에 적용되는 사례(Salako *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2020)에서 확장하여 이산화탄소 지중저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 분야에서 활용되고 있다(Chadwick *et al.*, 2010). 기후 위기에 대한 대응으로 국내 산업계와 연구 분야에서도 이산화탄소 지중저장의 타당성이 연구되었다(Yoo *et al.*, 2007; Wang, 2009). 특히 한국 지질자원연구원은 호주의 연구기관인 CO2CRC와 국제 공동연구사업을 통해 국내의 이산화탄소 지중저장 가능성을 개진하였다(Huh and Park, 2009; Shinn *et al.*, 2014). 또한 국제 공동 연구사업은 시간경과 탄성과 모니터링 자료에 대한 분석을 경험하는 계기가 되었다(Cheong and Kim, 2020). 시간경과 탄성과 모니터링 기술은 재현성이 높은 탄성과 자료가 반복적으로 얻어진 뒤 적용 가능하나, 국내에서는 고품질의 탄성과 3차원 탐사가 수행된 사례가 적고, 특히 현장에서 동일한 품질로 반복 취득된 4D 자료가 전무하다. 따라서 국내 탄성과 모니터링

기술 연구는 간접 분석, 모사 실험 및 공정설계 등이 간헐적, 제한적으로 진행되었다(Kim *et al.*, 2005; Park and Cho, 2008; Huh *et al.*, 2011).

2030년까지 연간 천만 톤의 이산화탄소를 저장할 수 있는 국내 저장소 확보가 추진 중이며(Kwon, 2016), 저장 후 이를 모니터링 할 수 있는 역량을 확보하기 위해서 독자적 탄성과 모니터링 기술의 구축이 필요하다. 이와 관련하여 포항 영일만에서 이산화탄소 지중저장의 가능성을 수치 모델링한 연구가 최근 발표되어 국내 모니터링 연구 여건이 조성되고 있다(Park *et al.*, 2021). 신규 모니터링 자료를 취득할 수 있는 여건이 충분하지 않은 현 상황에서 슬라이프너 자료와 같이, 연구가 많이 이루어진 기존 자료를 최대한 활용하는 것이 도움이 된다. 본 연구에서는 슬라이프너 시간경과 탄성과 자료를 활용하여, 지층 물성의 변화를 탐지하는 시간경과 탄성과 기술이 국내에서 확보 및 적용 가능한지 확인하고자 한다.

슬라이프너 프로젝트와 4D 탄성과 벤치마크 자료

슬라이프너 연구 프로젝트는 노르웨이 인근 북해에 위치한 대수층을 대상으로 이산화탄소를 주입, 지중저장을 시험하고 안정화를 확인하는 CCS 전주기 기술을 세계 최초로 실증한 프로젝트이다(Fig. 1). 석유가스 생산 저류층에서 회수율을 높이기 위한 이산화탄소의 주입과 지중저장은 예전에도 있었으나, 슬라이프너 프로젝트는 기후 위기에 대응하기 위한 온실가스 감축을 목표로 추진되었으며, 대규모 이산화탄소 지중저장을 성공하였다. 슬라이프너의

Fig. 1. Sleipner project site location map (modified from Furre *et al.*, 2017).

대수층에 주입하는 이산화탄소는 인근 천연가스 생산현장에서 부가적으로 발생한 이산화탄소를 활용하였으며, 주입 대상층은 심도 800 - 1,000 m에 위치한 Utsira 사암층이다(Fig. 2). 슬라이프너 프로젝트에서는 1996년과 2008년 사이의 기간 동안 연간 약 백만 톤의 이산화탄소가 지속적으로 주입되었고, 최근까지 주입이 이어져 2017년 기준 총 1,600만 톤이 저장되었다(Furre *et al.*, 2017; White *et al.*, 2018). 다량의 이산화탄소를 주입, 저장하였기 때문에 이산화탄소의 안정화 및 누출 여부를 확인하기 위하여 철저한 모니터링이 필요하였다. 지중저장 이산화탄소의 고해상도 모니터링은 적합성(conformance, 대상층 내 유동), 격리(containment, 저장영역 내부 보관) 및 비상시(contingency, 비정상 누출)로 나누어 수행되었다(Furre *et al.*, 2017). 모니터링에 활용된 다양한 지구물리 탐사기법은 대표적으로 탄성과 및 중력, 전기 비저항, 인공음원 전자기 유도 등이 있다(Landro *et al.*, 1999; Eiken *et al.*, 2008; Nakajima and Xue, 2013; Kang *et al.*, 2012). 본 연구에서는 이산화탄

Fig. 2. Diagram of Sleipner CCS project and the area of anomaly (modified from Smith *et al.*, 2011).

소 저장영역의 거동(plume)을 구체적으로 확인하여 발표한 기존 연구 사례가 많은 시간경과 탄성과 자료를 활용하여 Fig 2의 사각형 영역에 대하여 모니터링 자료처리 방법론을 시험하고자 한다. 모니터링 처리 방법은 탄성과 진폭 변화량의 도출 및 중합 입체의 트레이스별 진폭회수와 평활화 함수 적용이다. 처리된 결과는 기존 연구 사례와 비교 검증 과정을 거쳤으며, 성공적인 시간경과 탄성과 분석을 위해 고려해야할 탄성과 진폭의 조정 함수를 시험하고 최적의 입력변수를 탐색하였다.

최근 슬라이프너 그룹에서 공개한 시간경과 탄성과 벤치마크 자료는 가로와 세로 각각 4 km, 7 km 영역을 반복 탐사한 3차원 중합 입체 구조볼륨으로, 기존 자료가 1994년, 모니터링 자료가 2001, 2004, 2006, 2008 및 2010년 취득되었다(Table 1). 각 탐사 시기는 주입, 저장된 이산화탄소의 분포 영역의 확인과 그 변화(증가) 양상 확인을 목적으로 총 주입량을 고려해 결정되었다. 자료의 소유권은 노르웨이 석유회사인 Equinor에서 보유하고 있고 최근 공개되었다(Sleipner 4D Seismic Database, 2020). WesternGeco사에서 기존 자료부터 2001년 탐사자료까지 자료 취득과 처리를 담당하였고, 2007년 PGS 사에 의하여 재처리되었다.

본 연구에서는 슬라이프너의 4D 처리 기술을 우리나라에서 재현할 수 있는지에 대한 검토를 위해, 1994년 취득하고 2001년 재처리된 탐사자료를 기준 탐사로, 2008년 자료를 취득하고 처리된 모니터링 자료로 결정하였다. 2010년 탐사자료는 광대역 탐사구격으로 취득되어 자료의 구격이 상이하므로, 모니터링 시험 이후 축적된 기술의 활용에 이용이 가능할 것이다.

연구의 수행은 기존 자료와 모니터링 자료의 지하구조 입체(3차원 중합 볼륨) 입력, 시간경과 분석 모듈 시험, 진폭 변화량 도출의 순서로 진행되었다. 시간경과 모니터링은 Landmark Haliburton사의 자료처리 소프트웨어 Seis-Space4D를 사용하였으며 시간경과 자료의 위치정보 일치,

Table 1. Sleipner 4D seismic data and acquisition parameters (modified from Boait *et al.*, 2012)

Parameter	Year						
	1994*	1999	2001	2004	2006	2008*	2010
Shot interval (m)	18.75	12.5	12.5	18.75	18.75	18.75	12.5
Shooting direction	N-S	N-S	N-S	E-W	N-S	N-S	N-S
Group interval (m)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Sample interval (ms)	2	2	2	2	2	2	2
Record length (ms)	5500	4500	4500	6000	6000	6000	4608
Amount of injected CO ₂ (kt)	Before injection	2,303	4,210	6,909	8,414	10,213	12,080

*used in this study

전처리, 수평 공간 평활화(smooth) 및 시간 축 진폭 조정(gain)을 시험하도록 모듈을 구성하였다(Table 2). 시간경과 탄성과 모니터링 자료처리는 처리-해석 주체의 판단에 따라 다양하게 구성할 수 있으며, 여기서는 한국지질자원 연구원에서 국제공동연구 결과 구축한 기존 자료처리 구성을 바탕으로 수행하였다(Cheong and Kim, 2020). 시간경과 자료처리를 모듈화하여 수행하는 이유는 일반적인 탄성과 자료처리를 조합하여 반복 수행하는 과정을 단순화 및 규격화하기 위해서이다. 즉, 시간경과 자료처리는 매크로 모듈을 활용하며, 본 연구에서 활용한 전처리(preprocessing) 모듈의 경우 자료입력-트레이스소거-정보정-초동주시발췌-구간차폐-트레이스일차-자료출력 등 일반적인

자료처리 14개 함수를 조합하였다(Preprocessing flow, Table 2). 분석자의 판단에 따라 수~수십 개의 시간경과 자료처리 모듈을 순차 적용하는 것은 기존 탄성과 자료처리 함수를 수백 회 반복 적용하는 것과 같다. 따라서 탄성과 모니터링 기술의 적용은 상용화된 소프트웨어 모듈을 활용하는 것이 단순화 및 규격화에 유리하다. 본 연구는 일반화된 상용소프트웨어의 자료처리 방법론의 시험에 검증된 자료를 입력하고자 한다. 방법론 중 모든 시간경과 자료처리 모듈을 설명, 검증할 수 없으므로 모니터링에 가장 중요하다고 판단된 진폭 회수와 평활화 모듈에 대하여 매개변수를 시험한 결과를 기술하였다. 진폭 회수는 탄성과 진폭의 크기를 조절하므로 모니터링 전후 진폭 변화의 가시성을 높

Table 2. Workflow of time-lapse seismic processing to analyze Sleipner data

Processing module	Representative Input Parameters
Poststack Geom	Bin numbers / Xorigin / Yorigin
Preprocessing	Recording length / firstbreak picking / gain method / time window Flow:Inputs-TraceKill-HeaderStatic-TraceLength-4DTraceUtility-DataBaseHeaderTransfer-FirstBreakPicking-FindMask-MaskUnion-ApplyMask-AutomaticGainControl-TraceEqualization-TraceHeaderMath-Output
4D variable gain	Block calculation / trace calculation / time window / damping factor
4D smooth	Inline / Crossline smooth width

Fig. 3. Seismic sections and time-slice for acquisition vintage of 1994 (a) at inline number 1833, (b) at crossline number 1071, and (c) at travel time 950 ms, and vintage of 2008 (d) at inline number 1833, (b) at crossline number 1071, and (c) at travel time 950 ms.

이기에 효율적인 방법이다. 평활화 모듈은 인접한 탄성과 신호의 연속성을 조절하므로 진폭변화의 범위를 확인하는데 필요하다.

자료의 입력은 슬라이프너 프로젝트에서 공개한 도메인에서 내려받은 탄성과 자료처리 표준형식(seg-y)의 지층 입체구조를 SeisSpace 소프트웨어 형식으로 변환 후 저장하여 수행하였다. 입력된 자료가 슬라이프너 연구지역의 적절한 위치에 해당하는지 확인하기 위하여 기준 탐사와 모니터링 탐사의 대표 단면을 추출하여 살펴보았다. 추출한 위치는 탐사 종방향 1833 측선, 횡방향 1071 측선 및 시간축 950 ms 위치로 슬라이프너 프로젝트의 이산화탄소 주입 위치를 포함한다(Fig. 3).

기준 탐사자료의 경우 Utsira 사암층이 탐사자료 단면 상에서 양호한 수평 연속성을 보이며 균질하게 발달하는 양상으로 나타났다(Fig. 3(a) - (c)). 모니터링 탐사자료는 슬라이프너 프로젝트에서 거의 최대치의 이산화탄소가 주입된 후 얻어진 자료이므로 Utsira 층 내부에 선명하게 지층저장된 이산화탄소의 플룸 형태가 관측되었다(Fig. 3(d) - (f)). 특히 시간단면 950 ms에서 기준 자료는 진폭 변화가 거의 없지만 모니터링 자료에서는 이산화탄소 주입으로 인한 진폭 변화가 선명하였다(Fig. 3(c) and 3(f)). 슬라이프너 프로젝트의 전체 탐사 영역은 도시된 단면보다 넓은 영역을 포함하며, 시간경과 모니터링을 효과적으로 수행하기 위하여 대상층을 좁은 영역으로 한정하였고, 여기서는 Fig. 3의 사각형 구간에 대한 시간경과 처리를 수행하였다.

CO₂ 주입 변화량(Difference) 도출 및 모니터링 방법론 시험

시간경과 탄성과 모니터링의 가장 기초적인 속성은 기준 자료와 모니터링 자료의 진폭차이(변화량)가 된다. 지하 대상층에 주입된 이산화탄소가 지층 물성에 변화를 야기하고 반복적인 탄성과 탐사는 주입 전후의 지층 물성을 반영한 자료이므로, 그 차이를 관찰하여 지층저장된 이산화탄소의 모니터링이 가능하다. 기준 자료와 모니터링 자료의 차이를 구하기 위하여 필수적인 처리과정은 탄성과 기록 위치 일치(poststack geom)와 전처리(preprocessing)이다(Table 2). 탄성과 기록의 위치를 동일하게 만드는 과정은 기준 자료와 모니터링 자료가 같은 지역에서 취득이 되어도 일부 기록 신호의 편차가 발생하기 때문에 필요하다. 현장 자료취득 과정에서 최대한 동일한 지점에서 탄성과 음원을 발생시키고 반사파를 기록하는 노력이 경주되지만 육상 탐사의 경우 장애물 유무, 해상 탐사의 경우 파도와 조류의 변화 등으로 인하여 기록 위치가 달라질 수 있다. 슬라이프너 자료는 해상 탐사자료이고, PGS사에서 재처리 후 공개한 중합 입체의 기록 위치는 기준 자료와 모니터링 자료가 동일하다. 모니터링 방법론 시험에 입력자료로 이용하는 과정으로써 위치 일치 모듈에 탐사 기준점 좌표, 3차원 격자의 시작점, 최초 탐사 종방향 측선 끝점 좌표, 탐사 종/횡방향 측선 번호의 최솟값/최댓값을 입력하였다.

탐사자료의 위치 일치 후 탄성과 입체의 진폭을 전처리 모듈에 적용하고 기준 자료와모니터링 자료를 감산(sub-

Fig. 4. Difference between the baseline and the monitoring data depicted at (a) Inline 1833, (b) Xline 1071, and (c) Time Slice 950 respectively. Each difference is obtained by subtracting the baseline data from the monitoring data, that is, Fig. 4a = 3d-3a, Fig. 4b = 3e-3b, and Fig. 4c = 3f-3c.

traction)한 결과 탐사 종방향, 횡방향 및 시간단면에서 각각 진폭의 변화가 확인되었다(Fig. 4). 슬라이프너 4D 탐사는 주로 남북 방향으로 탐사가 수행되었고 탐사 종방향 측선 번호는 서쪽에서 동쪽으로, 횡방향 측선 번호는 남쪽에서 북쪽으로 번호가 증가한다. 기준 자료와 모니터링 자료의 대표측선으로 선택한 탐사 종방향 1833 측선 단면의 경우 횡방향 측선 번호 1030에서 1200 사이에서 진폭 변화가 크며, 범위는 남북 방향 3 km 이상의 거리이다(Fig. 4(a)). 탐사 횡방향 1071 측선 단면에서는 동서방향으로 측선 번호 1750에서 1850 사이에서 진폭 변화가 크게 보이며, 이는 1 km 폭 이상의 영역으로 Utsira 사암층에서 주입된 이산화탄소가 유동하였음을 나타낸다(Fig. 4(b)). 탄성과 도달시간 950 ms의 심도방향 단면의 진폭 변화를 확인하면 동서방향으로 좁고 남북방향으로 길게 확장된 이산화탄소의 저장영역이 도시되었는데 이는 남북

으로 길게 뻗은 Utsira층(Torp and Gale, 2004)으로 주입된 이산화탄소가 유동한 것으로 판단된다(Fig. 4(c)).

기준 자료와 모니터링 자료의 감산으로 계산된 진폭 변화를 통하여 지중저장된 이산화탄소가 정성적으로 모니터링 되었다. 시간경과 탄성과 자료처리 모듈의 이해도를 높이고 경험을 축적하기 위하여, 시간 축으로 진폭을 증가시키는 진폭 회수 모듈과 공간적으로 인접한 탄성과 진폭을 유사하게 조정하는 평활화 모듈을 시험하였다.

진폭 회수는 탄성파가 시간/공간 영역에서 전파되면서 감쇄되어 진폭이 줄어드는 현상을 보전하는 기법이다. 여기서는 시간축 감쇄를 식 (1)에 따라 보전하는 함수를 적용하였다.

$$f(t) = 10^t \times C/20 \quad (1)$$

Fig. 5. Parameter test results of variable gain with 0-2000 ms (left panel), 500-1500 ms (middle panel) and Utsira layer (right panel) for trace scaling with (a) individual traces and (b) entire traces.

여기서 $f(t)$ 는 보전되는 탄성과 진폭, t 는 기록 시간, C 는 진폭회수 상수로 6.0 dB이다. 진폭의 평활화는 탐사 종방향/횡방향 인접 측선의 개수를 평활화 폭으로 정하여 식 (2)와 같이 계산된다.

$$g(t) = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w g_i(t) \quad (2)$$

여기서 $g(t)$ 는 평활화되는 진폭, w 는 평활화 구간의 폭, $g_i(t)$ 는 각 시간 샘플에서의 탄성과 진폭이다. 진폭 회수와 평활화 모듈을 시험하는 이유는 시간경과 탄성과 모니터링이 특정 대상층의 미세한 진폭 변화를 확인하는 과정이므로, 수직 방향(시간 축)과 수평 방향(인접 측선 폭)으로 진폭이 변화하는 양상을 파악하기 위해서이다. 효과적인 모듈 활용이 가능하다면 향후 국내 이산화탄소 지중저장 대상층의 시간경과 탄성과 탐사자료가 확보되었을 때 기술 적용성을 높일 수 있을 것이다.

시간축 0 - 2000, 500 - 1500 ms 및 Utsira 층 해석 발체 구간의 세 가지 구간에 대하여 시간 변화 진폭 회수 모듈을 적용한 결과, 진폭 변화량은 동일하게 이산화탄소 저장영역을 도시하였다(Fig. 5(a)). 시간 구간이 상이한 경우 주입된 이산화탄소를 정성적으로 확인하는 결과는 유사하지만, 진폭 변화가 큰 이산화탄소 저장영역을 주변 퇴적층과 쉽게 구별하기 위하여 진폭 변화의 가시성을 크게 조정할 필요가 있었다. 개별 트레이스들에 대하여 최댓값, 최솟값을 고정하여 도시한 경우(Fig. 5(a)) 구간별 진폭 회수 모듈의 적용 결과가 유사하였지만 도시하는 전체 트레이스의 최솟값/최댓값을 기준으로 자료의 진폭 크기를 도시한 경우(Fig. 5(b)) 유의미한 차이가 관찰되었다. 전체 기록시간 구간(0 - 2000 ms)을 포함하여 계산하는 경우 배경잡음이 많고(Fig 5(b) left panel), 500 - 1500 ms 구간을 계산하면 전체적으로 잡음이 줄어들며(Fig 5(b) middle panel), Utsira 층 구간만을 계산하는 경우(Fig 5(b) right panel) 주입구간에 보다 집중하여 진폭 변화량을 모니터링할 수 있었다. 도

Fig. 6. Results of 4D smoothing module in time-lapse processing for input smoothing width of (a) 1, (b) 5, (c) 9, and (d) 13 adjacent inline/crosslines. Arrows in (a) indicate the background noise region and those in (d) show the regions of artifact.

시된 결과는 실제 자료의 진폭 값(true amplitude)을 회복한 결과가 아닌 저장소 구간에서 진폭차이를 시각적으로 강조한 것이다. 즉, 시간경과 탄성과 분석은 동일한 자료에 대하여 관심 영역의 진폭을 상대적으로 가시화할 수 있다. 진폭 변화량이 적절히 계산된 후 전체 트레이스 모음에 대하여 진폭의 최솟값/최댓값을 고정하고 도시하면, 저장소 영역 인근의 진폭 변화를 모니터링하기에 적합할 것이다. 개별 트레이스들의 진폭을 대비하는 경우 비반복성(Non-Repeatability)으로 인한 차이가 부각될 수 있으므로 탄성과 모니터링 과정에서는 주의가 필요하다.

시간경과 탄성과 분석 과정에서 수평적으로 진폭 변화를 뚜렷이 모니터링하기 위하여 평활화 모듈을 적용할 수 있으며, 슬라이프너 자료에 대하여 이를 시험하였다. 3차원 탄성과 자료의 탐사 종방향과 횡방향으로 인접하는 측선 1, 5, 9 및 13개 폭에 대하여 자료를 평균하여 기준 자료와 모니터링 자료의 진폭 변화량을 계산하였다(Fig. 6).

평활화하는 측선 폭이 1인 경우는 평활화가 없이 기준 자료와 모니터링 자료를 감산한 진폭 변화를 도시한 결과로, 화살표로 나타난 영역에 배경잡음이 확인되었다(Fig. 6(a)). 인접하는 5개 측선에 대하여 지층 입체를 평활화한 결과 기준 자료와 모니터링 자료의 탄성과 이벤트 수평 연속성이 증가하여 진폭 변화량에서는 신호 대 잡음 비가 증가하였다(Fig. 6(b)). 인접한 측선을 평활화하는 폭을 9개로 증가시킨 경우 역시 배경잡음이 다수 줄어들고 진폭 변화 신호가 상대적으로 강조되어 주입된 이산화탄소를 쉽게 모니터링할 수 있다는 결론을 얻었다(Fig. 6(c)). 해당 모듈의 평활화 폭을 일정 수준 이상으로 증가시킨 경우(13개 측선) 신호 대 잡음 비의 지속적인 향상은 없었으며, 화살표로 표시된 영역에서 반사면의 연속성이 증가하였다(Fig. 6(d)). 평활화 과정에서 반사이벤트의 수평 연속성이 과도하게 증가하는 경우, 진폭 변화량 계산 시 실제 이산화탄소의 주입으로 인한 영향이 아닌 연속적인 지층 이벤트가 도시될 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 시간경과 탄성과 자료처리 모듈로 수평 진폭을 보정하는 경우, 잡음에 비해 진폭 변화에 의한 신호를 모니터링하기에 적합한 평활화 폭을 시험하여 적용할 필요가 있다.

슬라이프너 프로젝트의 연구결과와 비교

슬라이프너 4D 탄성과 연구자료는 탄성과 현장자료 취득, 시간경과 분석 및 수치모델링 분야 등에서 다수의 연구 논문이 발표되었다(Arts *et al.*, 2005; Eiken *et al.*, 2011; Furre *et al.*, 2017). 그 중 지층저장 이산화탄소를 탄성과 모니터링한 대표적 연구결과와 본 연구의 자료처리 방법론의 시험 결과를 비교하였다. 20년간의 슬라이프너 프로젝트에서 모니터링하여 세부 층의 정확한 위치에서 진폭 변화

량을 도출한 결과(Fig. 7(a), Furre *et al.*, 2017)는 본 연구에서 종방향 측선 1833에서 추출한 단면의 나타난 진폭 변화 결과(Fig. 7(b))와 유사하였다. 공개된 슬라이프너 시간경과 탄성과 자료는 고해상도로 영상화된 지층 입체 자료이므로 진폭 변화 계산을 통하여 주입된 이산화탄소가 쉽게 모니터링되었다. 수직적으로 일부 층의 진폭 변화 양상에 차이를 보이는 것은 국제 연구결과가 단일 탐사 남북 방향 측선에서 변화량을 추출하지 않고 모니터링에 최적인 남서-북동 방향의 경로에 따라 탄성과 자료를 추출했기 때문으로 판단된다(Furre *et al.*, 2017).

시간경과 탄성과 분석에서 음과 양으로 나타나는 진폭 변화를 전체적인 이산화탄소 부존 영역으로 분석하기 위하여 절댓값, 제곱-평균-제곱근(root mean square) 및 다양한 속성을 도시하기도 한다. 슬라이프너 연구자료 중 탄성과 신호의 제곱-평균-제곱근을 구하여 이산화탄소 저장영역

Fig. 7. Comparison of time-lapse difference (a) benchmark difference (from the publication of Furre *et al.*, 2017) and (b) depicted difference in this study.

Fig. 8. Verification of CO₂ plume shape (a) benchmark result (from the publication of Chadwick and Noy, 2015), (b) major layer's difference (from the publication of Boait *et al.*, 2012), and (c) result of this study.

을 관찰한 결과는 이산화탄소 농도 별 확산 양상이 자세하게 나타내었다(Fig 8(a)). 특히 슬라이프너 연구결과는 Utsira 사암층 내부의 세부 층서별로 각각의 이산화탄소 저장 용구체적으로 구명하였는데, 그 중 주요한 진폭 변화량은 시간축 950 ms 단면에서 확인한 부존 영역을 대부분 포함하였다(Fig. 8(b)). 본 연구에서 도출한 제곱-평균-제곱근 속성의 950 ms 횡단면은 기존 연구 결과와 유사한 이산화탄소 저장영역을 도시하였다(Fig. 8(c)). 추가적인 지질 해석을 통하여 시간 단면이 아닌 이산화탄소 저장 층서 단면을 추출하는 경우 Fig. 8(a)와 유사한 저장영역 모니터링이 가능할 것이다.

토 의

시간경과 탄성과 모니터링은 특정 지역의 구체적 주입 대상층을 대상으로 고품질의 자료처리가 반복되어야 성공적으로 수행될 수 있다. 국내 이산화탄소 저장 연구/사업을 수행하는 경우 넓은 탐사 영역 중 이산화탄소 주입 후 진폭 이상대가 공간적으로 분포하는 지점을 찾기 어려울 수 있으며, 따라서 수치 모델링(numerical modeling) 연구를 통하여 주입된 이산화탄소가 어느 정도 진폭 강도로 어느 위치에서 진폭 특성을 보일 지 사전 연구가 필요할 것이다. 또한 지질 해석 분야의 사전 연구를 통하여 개별 반사이벤트에 대하여 모니터링을 수행할 수 있어야 이산화탄소의 주입량에 따른 진폭 변화량 차이를 정확히 예측 가능할 수 있을 것이다. 이 경우 공간적으로 이산화탄소 저장영역의 변화를 해석하는 임의의 위치에서 추출할 수 있게 되어 모니터링이 성공적으로 수행될 것이다. 대상층이 특정된 후 시간경과 탐사자료를 취득하면 동일한 품질의 처리를 바탕으로 기존 자료와 모니터링 자료의 지층 입체가 반복 도출되어야 하며, 지중저장된 이산화탄소 플룸이 구별되는 해상도가 확보되는 경우 간단한 4D 자료처리 모듈의 적용으로 진폭 변화량이 확인될 것으로 예상된다.

결 론

국제적으로 검증된 대수층 이산화탄소 지중저장 프로젝트인 슬라이프너에서 취득한 4D 탄성과 자료를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 이산화탄소 주입 전 기준 자료와 주입 후의 모니터링 자료를 감산하여 Utsira 사암층에 저장된 이산화탄소로 야기된 탄성과 진폭 변화를 정성적으로 확인하였다. 따라서 본 연구에서 시험한 탄성과 모니터링 방법론은 이산화탄소로 인한 지층의 물성 변화를 충분히 반영하는 해상도의 탄성과 자료(i.e. Sleipner

dataset bin size 15 m)에 대하여 적용 가능하다.

- (2) 수직/수평 방향 진폭의 보정을 수행하는 모니터링 모듈은 시간 축의 경우 대상층 구간을 한정하고 전체 트레이스 대비 진폭 변화량을 조정/도시하는 것이 효율적이고, 공간 축의 경우 진폭 평활화를 통하여 신호 대 잡음 비 향상이 가능하다. 이와 같은 시간경과 탄성과 자료처리 방법론을 성공적으로 적용하기 위하여, 분석 대상층에 대한 충분한 지식과 경험이 요구된다.
- (3) 고품질의 탐사자료를 취득할 수 있는 경우 국내 이산화탄소 저장 연구에서 이산화탄소 확산 범위와 누출을 모니터링하기 위하여 시간경과 탄성과 기술이 활용 가능할 것으로 판단된다.

시간경과 탄성과 분석기술은 유/가스전 생산회수 증진 분야에서 개발되어, 이산화탄소 지중저장 연구에 활발히 적용됨과 동시에 가스하이드레이트 부존/누출 특성 규명 등 다양한 분야로 확장이 가능하므로 지속적인 연구가 필요하다. 다만 성공적인 시간경과 탄성과 분석을 위하여 적절한 해상도의 입력 자료가 요구되므로 탐사 설계 및 취득 단계에서 주의가 필요하다. 향후 시추공, 생산정 물성 계측 결과와 시간경과 탄성과 기술을 통합하여 지층 특성 변화를 정량적으로 예측하는 경우 좋은 연구성과의 창출이 기대된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원에서 수행 중인 “CO2 지중저장소 저장효율 향상 및 안전성 평가 기술 개발(21-3413-1)” 연구사업과 “3D 해저 정밀영상화를 위한 복합 탄성과 탐사 및 실규모 고분해능 처리기술 개발(21-3312-1)” 연구사업의 지원으로 수행되었습니다. 저자들은 슬라이프너 라이선스 파트너 PL046의 벤치마크 자료(Sleipner 4D Seismic Dataset, 2020) 제공과 논문의 심사를 맡아주신 심사위원들께 감사드립니다.

References

- Arts, R., Chadwick, A., and Eiken, O., 2005. Recent time-lapse seismic data show no indication of leakage at the sleipner CO₂ injection site, *Proceedings of the 7th international conference on greenhouse gas control technologies, Vancouver, Canada*, p.653-660.
- Boait, F.C., White, N.J., Bickle, M.J., Chadwick, R.A., Neufeld, J.A., and Huppert, H.E., 2012. Spatial and temporal evolution of injected CO₂ at the Sleipner field, North Sea, *Journal of Geophysical Research*, 117, B03309
- Chadwick, A. and Noy, D.J., 2015. Underground CO₂ storage: demonstrating regulatory conformance by convert-

- gence of history-matched modeled and observed CO₂ plume behavior using Sleipner time-lapse seismics, *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 5(3), p.305-322.
- Chadwick, A., Williams, G., Delepine, N., Clochard, V., Labat, K., Sturton, S., Buddensiek, M., Dillen, M., Nickel, M., Lima, A.L., Neele, F., and Rossi, G., 2010. Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO₂ storage operation, *The Leading Edge*, 29(2), p.170-177.
- Cheong S., and Kim, B., 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.
- Eiken, O., Alnes, H., and Lippard, J., 2008. Monitoring Sleipner CO₂ injection with combined surface seismic and gravity data, In *First EAGE CO₂ geological storage workshop* cp-88-00012.
- Eiken, O., Ringrose, P., Hermanrud, C., Nazarian, B., Trop, T.A., and Hoier, L., 2011. Lessons learned from 14 years of CCS operations: Sleipner, In Salah and Snohvit, *Energy Procedia*, 4, p.5541-5548.
- Furre, A., Eiken, O., Alnes, H., Vevatne, J.N., and Kiaer, A.F., 2017. 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner, *Energy Procedia*, 114, p.3916-3926.
- Huh, C., Kang, J., Moon, I., Chang, D., Choi, H., Min, D., and Kang, S., 2011. Process design of CO₂ offshore geological storage and development of monitoring technology, *The Society of Naval Architects of Korea*, 6, p.93-101.
- Huh, D. and Park, Y., 2009. Status of Otway CO₂ Storage Project in Australia, *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(5), p.517-525.
- Kang, S., Seol, S.J. and Byun, J., 2012. A feasibility study of CO₂ sequestration monitoring using the mCSEM method at a deep brine aquifer in a shallow sea, *Geophysics*, 77(2), p.E117-E126.
- Kim H.J., Choi, J., Han, N., Nam, M.J., Song, Y., Lee, T.J., and Suh, J.H., 2005. Time-lapse geophysical monitoring of CO₂ sequestration, *Mulli-Tamsa*, 8(4), p.280-286.
- Kumar, A., Bear, A., Hammack, R., and Harbert, W., 2020. Seismic monitoring of CO₂ injection at an enhanced oil recovery site in Wellington, Kansas, *SEG Technical Program Expanded Abstract*, p.1344-1348.
- Kwon, Y., 2016. Review of CO₂ storage projects and driving strategy of CO₂ storage program in Korea, *KEPCO journal on electric power and energy*, 2(2), p.167-185.
- Landro, M., 2015. *Petroleum Geoscience (Bjørlykke K. Ed.)*, Springer, Berlin, Heidelberg, p.489-514.
- Landro, M., Solheim, O.A., Hilde, E., Ekren, B.O. and Stronen, L.K. 1999. The Gullfaks 4D seismic study, *Petroleum Geoscience*, 5(3), p.213-226.
- Lumley, D., 2001. Time-lapse seismic reservoir monitoring, *Geophysics*, 66(1), p.50-53.
- Lumley, D., 2010. 4D seismic monitoring of CO₂ sequestration, *The Leading Edge*, 29(2), p.150-155.
- Nakajima, T. and Xue, Z., 2013. Evaluation of a resistivity model derived from time-lapse well logging of a pilot-scale CO₂ injection site, Nagaoka, Japan, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, p.288-299.
- Nam, M.J. and Kim, W., 2011. An introduction to time-lapse seismic reservoir monitoring, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, 14(3), p.203-213.
- Park, S. and Cho, S.J., 2008. Development of experimental apparatus for Carbon Dioxide geological storage, *Proceedings of KSEG abstract*, p.141-144.
- Park, S., Kim, D., Oh, J., Min, D., and Kim, B., 2021. Review of the applicability of 4D Time-Lapse seismic monitoring system based on frequency-domain reverse-time migration to Pohang CCS demonstration, *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 58(5), p.394-407.
- Salako, O., Jin, L., Burnison, S.A., Hamling, J.A., Gorecki, C.D., Reed, S., and Richards, T., 2017. The value of 4D seismic monitoring at Bell Creek – a mature oil field undergoing CO₂ enhanced oil recovery, In *Proceedings of 79th EAGE Conference*, p.1-5.
- Shinn, Y.J., Park, C., Huh, D.G., and Synn, J., 2014. Geological modeling and simulations of CO₂ plume behavior in a saline formation, CO₂CRC Otway Project, Australia, *Journal of the Geological Society of Korea*, 50(3), p.387-400.
- Sleipner 4D Seismic Database, 2020.12.24., <https://co2datashare.org/dataset/sleipner-4d-seismic-dataset>
- Smith, L., Billingham, M.A., Lee, C., and Milanovic, D., 2011. Establishing and maintaining the integrity of wells used for sequestration of CO₂, *Energy Procedia*, 4, p.5154-5161.
- 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.
- Wang, S.K., 2009. Geological carbon sequestration: Now and after, *KIC news*, 12(2), p.1-10.
- White, J.C., Williams, G., Chadwick, A., Furre, A., and Kiaer, A., 2018. Sleipner: The ongoing challenge to determine the thickness of a thin CO₂ layer, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 69, p.81-95.
- Yoo, D.G., Kim, G.Y., Park, Y.C., Huh, D.G., and Yoon, C.H., 2007. Feasibility study for CO₂ Geological sequestration in Offshore Korean Peninsula, *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 44(6), p.572-585.

정 순 흥

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 CO2 지중저장연구단
책임연구원
(本學會誌 第57卷 第1号 参照)

박 권 규

1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 CO2 지중저장연구단
연구단장
(E-mail; kgpark@kigam.re.kr)

김 도 경

2021년 한양대학교 대학원 에너지자원공
학과 공학석사

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 CO2 지중저장연구단
인턴연구원
(E-mail; kimdk96@kigam.re.kr)

김 병 엽

1998년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2000년 한양대학교 대학원 자원공학과 공
학석사
2012년 한양대학교 대학원 지[구]환경시스
템공학과 공학박사

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

박 용 찬

1993년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1995년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2000년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학박사

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 CO2 지중저장연구단
책임연구원
(E-mail; ycpark@kigam.re.kr)

김 형 태

2021년 부경대학교 해양학과 이학사

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 CO2 지중저장연구단
인턴연구원
(E-mail; khtae@kigam.re.kr)