연구논문

오토웨이 탄성과 자료의 시간경과 모니터링 기술연구

정순홍^{1)*} · 김병엽¹⁾

Time-lapse Seismic Monitoring Technique for the Otway Site

Snons Cheong* and Byoung-Yeop Kim

(Received 17 December 2019; Final version Received 16 February 2020; Accepted 21 February 2020)

Abstract : This study demonstrates the use of a time-lapse seismic monitoring technique in the Otway project to measure CO₂ sequestration in a depleted gas reservoir (stage I) and in an aquifer (stage II), southern Australia. A total 15,000 t of CO₂ was injected in the Otway stage II, so that repetitive seismic surveys could be aimed at monitoring the behavior of the CO₂ in the aquifer by detecting the seismic amplitude anomalies. Subsurface seismic volumes were derived after applying various filters and verifying the seismic data, which mainly focuses on ground noise removal. The differences between seismic volumes before and after the CO₂ injection were shown by anomalies in the region. As the injection volume increased, the change in the RMS amplitude also gradually increased. The behavior of CO₂ in the storage layer was appropriately monitored. This study demonstrate the feasibility of detecting CO₂ using time-lapse seismic data.

Key words : time-lapse, monitoring, seismic, Otway

요 약 : 지하 심부 퇴적층 (1단계 고갈가스전, 2단계 염대수층)에 이산화탄소 지중저장을 시험하는 호주 오토웨이 프로젝트에 참여하여 공동 연구를 수행하고, 취득된 시간경과 탄성과 탐사자료를 처리하였다. 지중저장 대상층에 주입된 이산화탄소는 1단계 65,000 t, 2단계 15,000 t 이며 지층 반사파의 진폭 변화를 탐지하기 위하여 3차원 육상탄성과 탐사를 반복 수행하였다. 염대수층에 대한 이산화탄소 지중저장 모니터링 기술을 확보하기 위하여 오토웨이 2단계 프로젝트의 시간경과 탄성과 자료를 확보하고 탄성과 반응 변화를 탐지하였다. 먼저 지표 굴림파 잡음 제거를 중심으로 육상탄성과자료 전산처리 흐름을 조합, 적용하여 지하구조 입체를 도출하였다. 그리고 이산화탄소 주입 전과 후 탐사시기별 3차원 탄성과 탐사결과들의 차이를 계산하여 주입구간 주변에서 진폭 이상대를 확인하였다. 연구결과 이산화탄소 주입량 증가에 따라 RMS 진폭의 변화가 확인되었고 저장층의 이산화탄소 거동을 적절히 모니터링하였다.

주요어 : 시간경과, 모니터링, 탄성과, 오토웨이

서 론

탄성과 탐사는 지하 심부 지층의 구조를 비교적 정확하게 영상화하므로 탄화수소 탐사의 수단으로 활용되어왔다. 탄성과 탐사기술은 지층의 구조 파악을 목적으로 시작되어 탄성과 반사신호가 포함하는 정보를 폭넓게 이용하면서 보다 정확한 지층 구조, 속도, 밀도 등의 정적 물성(static property)을 파악하는 연구로 진화하였다(Graebner *et al.*, 1980; Dragoset, 2005). 최근의 탄성과 탐사기술은 지층의 구조 및 물성을 파악하는 특성을 복합적으로 활용하여 시간 경과에 따른 동적 물성(dynamic property)의 변화를 계

산하는 단계로 발전해왔다(Sarkar *et al.*, 2003; Grana and Mukerji, 2015). 시간 경과에 따른 지층의 물성변화를 감지하는 기술은 탄성과 탐사 과정에서 3차원 공간정보 외에 시간 경과를 추가적인 차원으로 고려하므로 통상 4차원(4D, 4-Dimensional) 탄성과 기술로 통칭하며 지구물리적 모니터링 기법으로 확립되었다(Lumley, 2001; Lumley, *et al.*, 2003). 4차원 탄성과 기술은 암석 역학적 변화를 탄성과 기술로 연계하는 종합적인 분야이며, 탐사 반복재현성을 고려하는 탐사설계 단계부터 지반 안정성을 확인하는 탐사안정화 단계까지 영향을 미치는 탄성과 탐사 분야의 완성형 기술이다(Landro, 2015).

탄성과 4D 모니터링은 지하 심부 지층의 동적 물성 변화가 단시간에 발생하는 경우 적용 가능하다. 이러한 물성 변화를 야기할 수 있는 요인은 석유가스 자원의 개발로 인한 유체(물/탄화수소) 농도 또는 포화도 변화, 기후변화 등의

1) 한국지질자원연구원 석유해저연구본부

*Corresponding Author(정순홍)

E-mail; snons@kigam.re.kr

Address; Petroleum and Marine Research Division 124,
Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

영향으로 야기된 지하수위의 급격한 변동, 이산화탄소의 지중저장과 같은 사례의 인위적 유체의 주입/추출 등이 있다. 초기 탄성과 모니터링 기술개발의 상업적 근거는 유가스전의 회수 증진(Enhanced Oil Recovery)에서 비롯되었다. 이후 과학기술적 적용 가능성이 확인된 사례는 노르웨이 Sleipner 지역의 염대수층에 온실가스인 이산화탄소 화합물을 주입하고 그 거동을 확인하는데 성공한 것이다 (Chadwick *et al.*, 2010). 이후 기후변화의 대응을 위하여 이산화탄소 저감이 큰 이슈가 되는 추세와 함께 탄성과 모니터링은 대규모 이산화탄소 저장영역의 모니터링 수단으로 위상이 제고되었다.

성공적인 파일럿 규모 이산화탄소 저장 연구사업인 호주 오토웨이 프로젝트는 다양한 과학/공학 기술을 종합적으로 적용하여 지중저장을 연구한 사례이며, 탄성과 모니터링 기술은 연구과정에서 중심 역할을 하였다(Pevzner *et al.*, 2011; Pevzner *et al.*, 2013). 오토웨이 프로젝트는 연차별 기술보고서 발간 외에 많은 논문과 특허가 창출된 과제이며, 다양한 국제협력을 시도하였다. 대한민국 에너지기술평가원은 호주와 공동연구 의제를 도출하여 국제공동연구사업을 추진하였고, 그 일환으로 한국지질자원연구원은 오토웨이 프로젝트에 참여하게 되었다(Huh and Park, 2009; Shinn *et al.*, 2014). 이 논문은 한국지질자원연구원 에서 국제공동연구로 오토웨이 탄성과 모니터링 프로젝트에 참여하고 취득된 자료를 독자적으로 처리한 결과를 기술한다. 공동연구 협력을 통해 비교검증 과정을 거쳤으며, 탄성과 모니터링 자료처리 흐름을 구축한 결과를 보고한다. 탄성과 모니터링 기술은 주요 석유회사를 제외하면 USGS(United States Geological Survey), BGS(British

Geological Survey) 및 Curtin University 등 소수연구기관에서 컨소시엄 형태로 확보한 자료를 활용하여 완성되는 기술이므로, 본 연구에서 확보한 결과는 향후 국내 이산화탄소 지중저장 연구기술의 수준 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

연구 지역 및 자료

오토웨이 프로젝트는 이산화탄소 포집과 저장을 연구하는 기관인 CO2CRC(Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies)에서 주관하는 파일럿 프로젝트이다. 호주 빅토리아주 남서부 오토웨이 분지는 초임계 상태의 이산화탄소를 지중저장하기에 적합한 사암 대수층과 그 상부의 덮개암이 분포한다(Fig. 1). 오토웨이 이산화탄소 지중저장 프로젝트는 1단계로 고갈 가스전이 위치하는 Waarre-C 층에 65,000 t, 2단계에서 대수층인 Paaratte 층에 15,000 t의 이산화탄소를 주입하고 모니터링을 위한 고해상도 육상 탄성과 탐사를 반복 수행하였다(Sharma *et al.*, 2007; Cook, 2014).

오토웨이 2단계 탄성과 모니터링 기술의 적용은 국제공동연구 협력기관인 호주 Curtin University에서 주관하여 수행되었고 지중저장 이산화탄소의 거동 확인 및 추적에 성공하였다(Pevzner *et al.*, 2017). 2단계 프로젝트 진행과정은 2014년 기획단계를 거쳐, 2015년 초시추공 주입시험(Stage 2B)과 파일럿 규모의 이산화탄소 주입 및 모니터링 탐사(Stage 2C)가 순차적으로 이어졌다. 2015년 장비설치 후 기준탐사(Base-Line Survey, BL)가 수행되었고 12월 본격적인 주입을 시작으로 5,000 t 주입 후 첫 번째 모니터

Fig. 1. Otway project site location map with injection (CRC-1, CRC-2) and monitoring (Naylor-1) wells (Cook, 2014; Sharma *et al.*, 2009)

링 탐사(M1), 10,000 및 15,000 t 주입 후 두 번째(M2) 및 세 번째 탐사(M3)가 수행되었다(Fig. 2). 이산화탄소 주입 이후 1년(M4) 및 2년 경과 시점(M5)에 주입된 이산화탄소의 안정화를 확인하기 위한 탐사를 추가 수행하였다.

탄성과 모니터링 탐사작업과 시추공 주입/압력측정 작업은 Fig. 2에서 각각 보라색과 주황색 사각형으로 표시되었으며, 모니터링의 주요 목표는 붉은 색 마름모로 표시되었다. 모니터링 탐사 단계별로 M1, M2, M3의 목표(Objective 1)는 주입된 이산화탄소의 탐지, M4의 목표(Objective 2)는 이산화탄소 저장영역의 확산(Evolution), M5단계에서는 저장된 이산화탄소의 안정화(Stabilization) 확인으로 심화되도록 구성하였다. 한국지질자원연구원은 공동연구 과정에서 탐사 준비, 장비 설치, 현장탐사 수행 및 신호 기록에 참여하였고 BL, M1, M2, M3, M4, M5자료를 확보하였다(Table 1 및 Fig. 3). 특히 탄성과 탐사는 모니터링 자료

의 품질을 최대한 균일하게 유지하기 위하여 탐사시기를 동일한 계절로 맞추어 취득하였다. 이는 육상 탄성과 반사 기록신호의 품질이 표층의 단단하기/무르기 조건에 영향을 받기 때문이었다.

오토웨이 프로젝트는 탐사 자료취득 변수와 관련하여 지질해석과 모형반응 계산 등의 사전 검토를 수행하였고 최종적으로 각 탐사에 이용된 매개변수는 Table 2와 같다. 주입 대상 지층은 수평적으로 평탄하고 시추공 서쪽으로 일부 단층이 분포하여 주입된 이산화탄소는 동쪽으로 이동할 것으로 예측되었다. 지질 해석을 바탕으로 지층 영상화와 시간경과에 따른 물성변화가 확인될 것으로 판단되는 탐사 음원은 26,000 lbs 규모의 진동음원을 3003개 위치에서 발파하였다. 지중에 매설된 수신기는 909개 위치에서 탄성과 반사파를 1 ms 간격으로 4 s까지 기록하였다.

Fig. 2. Progress and activities of the Otway project (Watson, 2015).

Table 1. Data list for seismic monitoring of stage II Otway project

No. (Date)	Subject area	Description	Remark
1st (2016)	Stage 2C Baseline Seismic Data	Correlated data with geometry in trace headers	SEG-Y format
2nd (2017)	Monitoring Data M1, M2, M3	Correlated data with geometry in trace headers	SEG-Y format
3rd (2018)	Monitoring Data M4, M5	Correlated data with geometry in trace headers	SEG-Y format

Fig. 3. Source and geophone locations of the Otway 2C project.

Table 2. Acquisition parameters of stage II Otway seismic survey

Acquisition Parameters	value
Total Number of Source Lines	26+1 Lines (26 E-W, 1 N-S direction)
Total Number of Sources	3003 Points
Source Type	Vibroseis (INOVA UniVibe, 26000 lbs)
Source Line Spacing	from 50 m to 100 m
Source Point Spacing	15 m
Total Number of Receiver Lines	11 Lines
Total Number of Receivers	909 Points
Receiver Line Spacing	100 m
Receiver Point Spacing	15 m
Maximum Offset	2,480 m
Sample Interval	1 ms
Recording Length	4 s

육상 탄성파 3차원탐사 자료처리

이산화탄소가 지하의 저장 대상층에 주입되면 지층 물성에 일부 변화를 야기하며, 모니터링 기술은 반복적인 탄성파 탐사를 시간경과에 따라 수행하여 반사기록 신호로부터 물성 변화를 감지하고자 한다. 이를 위한 기본적인 자료처리는 동일 시점의 탐사자료에 대하여 신호와 잡음의 비율 (signal to noise ratio, S/N)을 최대화하는 겹쌓기(stack) 과정을 통하여 지층의 구조를 정확하게 구현하는 3차원 입체(volume) 정보를 도출하는 것이다. 아울러 상이한 시점의 탐사자료들인 BL, M1 ~ M5에 대하여 동일한 과정의 처리를 적용하여 품질이 대등한 입체 지층구조를 작성해야 한

Fig. 4. Data processing workflow to build basic subsurface volume of Otway.

Fig. 5. Fold number map of stage II Otway seismic monitoring.

다. 이 연구에서는 모니터링 기간 동안 높은 품질로 취득된 균질한 탐사자료에서 굴림파 잡음(groundroll noise)을 최소화하고, 실제 지층구조를 반영하는 지층 입체를 도출하는 자료처리 흐름을 구성하였다(Fig. 4).

탄성파 기본자료처리의 첫 번째 단계로, 탄성파가 발생한 음원과 이를 기록하는 수신기 위치로부터 지하 반사점(공동중간점)의 위치를 계산하고 그 공간정보를 탄성파 기록과 결합하는 과정이 중요하다. 탐사지역을 일정한 격자로 나누고 격자 위치가 공동중간점을 포함하는 탄성파 기록의 개수(fold number)를 계산한 결과 각 자료마다 100개 이상의 탄성파 기록이 얻어졌다(Fig. 5).

육상 탄성파 탐사자료의 품질을 저해하는 가장 주요한 요소인 굴림파 잡음의 제거를 위하여 전산처리 소프트웨어

Fig. 6. Representative shot gathers of stage II Otway monitoring after (upper) and before (bottom) data processing where triangles, rectangles and arrow indicate groundroll-dominant-areas, bad-traces and data-processing-sequence, respectively.

(ProMax/SeisSpace by Landmark co. Ltd.)에서 제공하는 특이값 분해(singular value decomposition)를 이용한 필터를 활용하였다(Kendall and De-Meersman, 2005). 자료처리 적용 전과 후의 탄성과 음원 기록을 확인한 결과 굴림과 잡음이 상당수 제거되어 검광기에 적합한 품질로 개선되었음을 확인하였다(Fig. 6).

Fig. 7. Representative NMO-corrected shot gathers with initial velocity after (upper) and before (bottom) noise attenuation processing. Rectangle and arrow indicate noise-attenuation and data-processing-sequence, respectively.

이산화탄소 지중저장 대상층의 심도에서 기록된 탄성과 신호의 크기가 상대적으로 적게 확인되어 속도분석에 충분치 않은 점을 보완하기 위하여 소음 감쇠(noise attenuation) 과정을 추가하였다. 소음 감쇠 필터로는 표면파 잡음 감쇠(surface wave noise attenuation, 900 m/s)와 음파 감쇠(air blast attenuation, 331 m/s)를 중복 적용하였으며 결과적으로 탄성과 기록시간 1,000 ~ 1,800 ms 구간의 신호 진폭이 증가되도록 보정하였다(Fig. 7). 탄성과 자료를 영위상을 갖는 썬기 파형으로 압축하기 위한 곱풀이(zero-phase spiking deconvolution)에 적용하고 도출된 음원모음으로부터 겹

Fig. 8. Verification of 3D seismic data processing depicted at Inline 110. Both seismic sections of CO2CRC for benchmark (Pevzner *et al.*, 2011) and of KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) have imaged the Paaratte formation where is CO₂ injection interval indicated by arrows.

쌓기에 적합한 속도를 분석(Velocity Analysis), 결정하였다. 전처리가 적용된 자료를 공통중간점 모음으로 변환 후 수직 시간차보정(Normal Move Out Correction)하여 S/N을 최대화하였다. 최종적으로 겹쌓기와 참반사보정(Migration)을 적용한 결과 오프웨이 분지의 퇴적층서가 수평적으로 발달하는 양상을 잘 나타내는 지층 입체구조를 도출하였다(Fig. 8). 오프웨이 2단계 연구의 이산화탄소 저장 대상층은 사질 염대수층으로 탄성과 왕복 기록시간 1,200 ms 심도에 위치한다. 이산화탄소 저장층의 구조는 호주에서 발표한 자료(Fig. 8(a); Pevzner *et al.*, 2011)와 품질이 대등한 수직 단면(Fig. 8(b))을 본 연구에서 도출하였고 탄성과 모니터링에 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. Fig. 8의 두 탄성과 단면의 차이점은 자료처리 과정에서 주파수 대역, 잡음 소거 구간의 설정 등 일부 매개변수가 다르게 설정되어 발생하였을 것이다. 또한 중합속도와 필터링 적용구간 등이 상이하므로 동일한 단면이 도출될 수는 없으나, Fig. 8(b)에서 화살표로 표시된 이산화탄소 주입층의 형태는 두 단면이 동일한 구조를 보였다.

시간경과 탄성과 모니터링 분석

기준탐사(BL)와 시간경과에 따른 각 시점의 모니터링 탐사(M1 ~ M5) 자료에 동일한 자료처리 흐름을 적용하였고 결과적으로 도출된 지층 입체들은 유사한 구조를 반영하는 균질한 품질임을 확인하였다(Fig. 9).

탄성과 모니터링은 시간 차이를 두고 기록한 3차원 탄성과 탐사자료들을 처리하여 도출된 지하 입체구조들의 차이(difference)를 구하는 방법으로 요약된다. 통상 모니터링

Fig. 10. Data processing workflow to build the difference between monitoring and baseline survey results.

결과에서 기준탐사결과를 감산(subtraction; $M - D$)하여 차이를 계산한다. 두 탄성과 자료를 감산하기 위하여 탄성과 기록 위치를 일치시키고, 각 신호의 양과 음의 진폭들이 대등하도록 조정한다. 단계적으로 신호와 잡음들이 높은 연관성을 갖고 감산 되도록 자료처리 모듈의 조합을 활용하는 4D 자료처리 흐름을 구성하였다(Fig. 10). 단계별 자료처리 모듈을 적용한 목적과 기능은 Table 3에 요약되었다.

지중 저장된 이산화탄소의 거동을 파악하기 위하여 모니터링 탐사 시점의 지층입체와 기준 탐사의 지층입체의 차이(M1-BL, M2-BL, M3-BL, M4-BL, M5-BL)를 각각 계산하였다(Fig. 11(a)). 탐사자료 차이의 양상이 M1-BL, M2-BL, M3-BL과 M4-BL, M5-BL의 경우 상이하게 나타

Fig. 9. Comparison of representative sections at Inline 110 for BL, M1, M2, M3, M4 and M5, respectively (from left to right, green rectangle indicates M3 data which is software's current workspace).

Table 3. Description of 4D processing flow

4D Processing Module	Objective/Function
Poststack Geometry	Assign multiple 3D data on the same Inline, Xline and CDP geometry
4D Preprocessing	Equalize the recording time and noise mute table, reset static value on trace header and unify gain recovery
Intersection	Synchronize the intersection location for two input data by time/space
Amplitude Envelope Cross Equalization	Cross equalizing for amplitude of input dataset
Frequency Balance	Equalize the frequency spectrum of input dataset
Static	Static correction for minimizing the wavelet difference between two input datasets
Phase Cross Equalization	Phase rotation for minimizing the phase difference between two input datasets
Gain	Gain correction of control data
Match Filter	Moving average match filter
Difference	Subtraction between input dataset

났으며, 이는 현장 탐사자료의 기록 형식이 BL~M3은 IEEE, M4와 M5는 IBM Reel로 다른 점에서 기인한 것으로 추정된다. 성공적인 탄성파 4D 모니터링 처리는 기록 형식에 구애 받지 않고 모니터링이 가능해야 하므로, 향후 모

니터링 처리기법의 개선을 통하여 오류를 수정할 필요가 있다.

CO2CRC 연구진은 오프웨이 2단계 프로젝트의 이산화탄소 주입공 CRC-2를 중심으로 탄성파 진폭변화를 명확

Fig. 11. Results of time-lapse analysis (a) baseline section and differences of M1-BL, M2-BL, M3-BL, M4-BL and M5-BL of Xline 124 (from left to right), (b) CO2CRC's baseline section and differences M1-BL and M2-BL with CRC-2 well trajectory indicated the red solid line (Pevzner *et al.*, 2017), (c) KIGAM's baseline section and differences M1-BL, M2-BL and M3-BL enlarged on the target interval.

히 확인한 결과를 발표하였다(Fig. 11(b); Pevzner *et al.*, 2017). 본 연구에서도 호주측 연구결과와 동일하게 붉은 실선으로 표시된 주입공(CRC-2)을 지나는 탄성과 탐사 횡측선 124번 주변의 진폭 변화를 검토하였다(Fig. 11(c)). 이산화탄소 주입량 증가(5, 10, 15 kt 주입량의 M1-BL, M2-BL 및 M3-BL)에 따라 탄성과 자료의 진폭 변화가 증가함을 확인할 수 있었다.

이산화탄소 주입 시기의 모니터링과 기준자료 변화량(M3-BL)과 안정화 단계의 모니터링과 기준자료 변화량(M5-BL)의 양상이 다른 이유(Fig. 11(a))를 고찰하기 위하여 공심점 모음자료를 출력하고 비교하였다. 기준자료(Fig. 12(a))와 M3(Fig. 12(b)) 및 M5(Fig. 12(c))의 동일한 공심점의 탄성과 기록들은 육안으로 차이를 판단하기 어려운 정도로 균질한 품질이었다. 중합 및 구조보정 후의 탄성

파 볼륨 상에서는 천부 지층의 반사파형, 이산화탄소 주입 구간인 1,200 ms 전후, 심부 고갈가스전 근방의 배사구조에서 상이한 영상을 나타냈다(Fig. 12(d) and Fig. 12(e)). 이와 같은 차이의 원인은 앞에서 자료 기록형식의 차이로부터 기인한 것으로 추정하였으나, 자료처리 매개변수의 일정한 적용 과정에서 발생한 오차일 가능성을 배제할 수 없다. 향후 모니터링 처리 적용구간의 최적화 또는 위상/주파수 조정 매개변수의 최적화 과정을 추가 시험하여 모니터링 결과의 품질 향상이 필요할 것으로 판단된다.

탄성과 자료로부터 제곱-평균합-제곱근(Root Mean Square, RMS)을 계산하고 도시하여 음과 양의 진폭 변화 영역을 가시적으로 구별하고자 하였다. 이산화탄소 15,000 t이 주입된 구간에 해당하는 탄성과 왕복 도달시간 1,240 ms 심도에서 RMS 속성의 변화가 크게 나타났다(Fig. 13). 따라서

Fig. 12. Comparison of seismic data by acquisition time, CDP gather sample at (a) baseline survey, (b) 3rd monitoring survey just after CO₂ injection, (c) 5th monitoring survey 2 years after CO₂ injection, (d) Inline 110 sections of baseline and monitoring-3 volumes and (e) Inline 110 sections of baseline and monitoring-5 volumes.

Fig. 13. RMS amplitude of differences M1-BL, M2-BL and M3-BL at depicted Xlines of 121-124 where are adjacent area affected by CO₂ injection. CO₂ plume grows with the increasing of CO₂ injection (5, 10 and 15 kt from top to bottom).

본 연구에서 수행한 시간경과 탄성과 모니터링 자료처리는 지하 매질의 국지적인 물성 변화를 탐지할 수 있음을 확인하였다. 특히 지중저장된 이산화탄소의 시간경과 탄성과 모니터링은 주입량에 따른 진폭변화가 일관된 양상을 보여야 한다. 오프웨이 2단계 4D 탄성과 자료는 수년 간 정확한 탐사가 일정한 품질로 수행되어 반복성(repeatability)이 높기 때문에 본 연구에서 모니터링 기술을 시험하기에 적합하였다.

결 론

이 연구에서는 시간경과 탄성과 자료를 이용하여 지중저장된 이산화탄소의 거동을 탐지하는 기술을 개발하고, 지표음원 3차원 탄성과 탐사자료를 반복 수행한 자료에 적용하여 지중저장된 이산화탄소를 모니터링하였다. 시간경과 탄성과 탐사는 배경잡음의 변화에 비해 상대적으로 지하의 물성변화로 인한 탄성과 기록신호의 변화량이 크게 측정되어야 하므로 고해상도의 연구자료가 필요하다. 서호주 오프웨이 분지에서 국제공동연구를 수행하여 반복적으로 취득된 육상 탄성과 탐사 자료를 활용하여 모니터링 기술을 검증하였다. 시간경과 분석 결과 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 시간경과 탄성과 탐사자료를 3차원 처리하여 균질한 품질의 시간경과 볼륨을 작성, (2) 시간경과 4차원 처리 흐름을 구성하고 볼륨들 간 시간경과 차이를 계산, (3) 계산된 차이는 지중 저장된 이산화탄소의 거동을 반영하는 이상치

를 도출, (4) 결과적으로 탄성과 자료처리로 지중저장 이산화탄소를 모니터링 하는 기술을 확보하였다.

국내 탄성과 탐사자료의 처리기술은 파형역산 등의 분야에서 세계 수준을 확보하고 있으며, 이와 같은 정량적인 분석기술은 모니터링 분야로 확장될 필요가 있다. 본 연구를 통하여 국내 탄성과 탐사자료의 모니터링 기술 자립화 가능성을 확인하였고, 향후 정량적인 물성의 추적과 예측 등의 연구성과로 자료의 활용 가치가 높을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원에서 수행 중인 “대규모 CO₂ 저장 후보지 잠재성 평가(19-3421)” 연구사업과 에너지기술평가원의 에너지국제공동연구사업 “국내 CO₂ 지중 저장 실증을 위한 4D 모니터링과 주입자료의 통합 매칭기술 개발(17-4823)”의 지원으로 수행되었습니다. 국제공동연구를 함께 수행한 Roman Pevzner 교수 및 연구진과 심사를 맡아주신 심사위원들께 감사드립니다.

References

- 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.
- Cook, P., 2014. *Geologically storing carbon: Learning from the Otway Project experience* (Ed.), CSIRO PUBLISHING, Melbourne, p.155-196.
- Dragoset, B., 2005. A historical reflection on reflections. *The Leading Edge*, 24(1), p.46-70.
- Graebner, R. J., Steel, G., and Wason, C. B., 1980. Evolution of Seismic Technology into the 1980's. *The APPEA Journal*, 20(1), p.110-120.
- Grana, D. and Mukerji, T., 2015. Bayesian inversion of time-lapse seismic data for the estimation of static reservoir properties and dynamic property changes. *Geophysical Prospecting*, 2015, 63(3), p.637-655.
- Huh, D. and Park, Y., 2009. Status of otway CO₂ storage project in australia. *J. of the Geological Society of Korea*, 45(5), p.517-525.
- Kendall, R. and De-Meersman, K., 2005. A complex SVD-polarization filter for ground roll attenuation on multi-component data. *Proc. of EAGE Conference 2005*. cp-1-00208.
- Landro, M., 2015. 4D seismic. *Petroleum Geoscience*. Springer, Berlin, Heidelberg, p.489-514.
- Lumley, D., 2001. Time-lapse seismic reservoir monitoring. *Geophysics*, 66(1), p.50-53.
- Lumley, D., Adams, D.C., Meadows, M., Cole, S., and Wright, R., 2003. 4D seismic data processing issues and examples. *Proc. of SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Dallas, Texas, p.1394-1397.
- Pevzner, R., Shulakova, V., Kepic, A., and Urosevic, M., 2011. Repeatability analysis of land time-lapse seismic data: CO2CRC Otway pilot project case study. *Geophysical prospecting*, 59 (1), p.66-77.
- Pevzner, R., Urosevic, M., Caspari, E., Galvin, R.J., Madadi, M., Dance, T., Shulakova, V., Gurevich, B., Tcheverda, V., and Cinar, Y., 2013. *Feasibility of time-lapse seismic methodology for monitoring the injection of small quantities of CO₂ into a saline formation*, CO2CRC Otway Project. Energy Procedia, 37, p.4336-4343.
- Pevzner, R., Urosevic, M., Popik, D., Shulakova, V., Tertyshnikov, K., Caspari, E., Correa, J., Dance, T., Kepic, K., Glubokovskikh, S., and Ziramov, S., 2017. 4D surface seismic tracks small supercritical CO₂ injection into the subsurface: CO2CRC Otway Project. *Int. J. of Greenhouse Gas Control*, 63, p.150-157.
- Sarkar, S., Gouveia, W.P., and Johnston, D.H., 2003. On the inversion of time-lapse seismic data. *Proc. of SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003*, Dallas, Texas, p.1489-1492.
- Sharma, S., Cook, P., Berly, T., and Anderson, C., 2007. Australia's first geosequestration demonstration project—the CO2CRC Otway Basin Pilot Project. *The APPEA Journal*, 47(1), p.259-270.
- Sharma, S., Cook, P., Berly, T., and Lees, M., 2009. *The CO2CRC Otway Project: overcoming challenges from planning to execution of Australia's first CCS project*. Energy Procedia, 1(1), p.1965-1972.
- 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. *J. of the Geological Society of Korea*, 50(3), p.387-400.
- Watson, M., 2015. *CO2CRC Otway stage 2: CO₂ storage in saline formation*. Presentations of CSLF Technical Group Meeting, Riyadh, Saudi Arabia, PIRT-7.

정 순 홍

2001년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학과 공학사
 2003년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학과 공학석사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 선임연구원
 (E-mail: snons@kigam.re.kr)

김 병 엽

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 해저지질탐사연구센터장
 (本學會誌 第56卷 第1号 參照)