캐나다 아퀴스토어 CCS 프로젝트의 이산화탄소 모니터링을 위한 Baseline 탄성과 속성분석

정순홍¹ · 김병엽^{1*} · 배재유²

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부, ²한국석유공사 CCS전담반

Baseline Survey Seismic Attribute Analysis for CO₂ Monitoring on the Aquistore CCS Project, Canada

Snons Cheong¹, Byoung-Yeop Kim^{1*} and Jaeyu Bae²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Petroleum & Marine Research Div.

²Korea National Oil Company, R&D Dept., CCS TFTeam

CO₂ Monitoring, Mitigation and Verification (MMV) is the essential part in the Carbon Capture and Storage (CCS) project in order to assure the storage permanence economically and environmentally. In large-scale CCS projects in the world, the seismic time-lapse survey is a key technology for monitoring the behavior of injected CO₂. In this study, we developed a basic process procedure for 3-D seismic baseline data from the Aquistore project, Estevan, Canada. Major target formations of Aquistore CCS project are the Winnipeg and the Deadwood sandstone formations located between 1,800 and 1,900 ms in travelttime. The analysis of trace energy and similarity attributes of seismic data followed by spectral decomposition are carried out for the characterization of CO₂ injection zone. High trace energies are concentrated in the northern part of the survey area at 1,800 ms and in the southern part at 1,850 ms in travelttime. The sandstone dominant regions are well recognized with high reflectivity by the trace energy analysis. Similarity attributes show two structural discontinuities trending the NW-SE direction at the target depth. Spectral decomposition of 5, 20 and 40 Hz frequency contents discriminated the successive E-W depositional events at the center of the research area. Additional noise rejection and stratigraphic interpretation on the baseline data followed by applying appropriate imaging technique will be helpful to investigate the differences between baseline data and multi-vintage monitor data.

Key words : seismic trace energy, similarity, spectral decomposition, CCS

주입된 CO₂가 환경에 영향을 미치지 않고 지하에서 안정적으로 저장되어 있는지를 총체적으로 모니터링 하는 주입 및 주입 후 관리 (Monitoring, Mitigation and Verification, MMV) 기술은 이산화탄소 지중저장 분야에서 경제적 및 환경적으로 매우 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 해외 대규모 지중저장 프로젝트를 보았을 때 주입한 CO₂의 거동을 가장 효율적으로 모니터링할 수 있는 방법 중의 하나로 탄성파를 이용한 시간 경과 (Time-lapse) 모니터링 기술이 그 핵심으로 떠오르고 있다. 이 연구에서는 캐나다 Estevan에 위치한 Aquistore 이산화탄소 주입 현장의 3차원 베이스라인 (baseline) 탄성과 자료를 수집하고 분석하여 국내 지중저장 탄성과 모니터링 실증화를 위한 기초 연구를 수행하였다. 이산화탄소 주요 저장 대상층은 탄성과 도달 시간 1,800 ~ 1,900 ms 깊이의 Winnipeg 와 Deadwood 사암층이다. Aquistore 탄성과 자료에 대한 에너지, 유사도(similarity)를 도출하고 주파수를 분해하여 CO₂ 주입 대상층의 특성을 규명하였다. 그 결과 동시선도 1,800 ms의 연구지역 북측, 1,850 ms의 남측에 탄성과 에너지가 큰 영역이 집중적으로 분포함을 확인할 수 있었고, 탄성과 에너지 속성을 도시하여 반사계수가 큰 사질 퇴적양상이 우세한 영역을 구분할 수 있었다. 또한 탄성과 기록의 유사도를 도출하여 두 개의 주요한 구조선이 북서-남동 방향으로 지중저장 대상층을 절단함을 확인하였다. 탄성과자료의 주파수를 성분별로 분해하고 5, 20 및 40 Hz 성분을 분석한 결과 연구지역의 중앙에서 동서 방향으로 발달하는 균질한 퇴적 양상이 구체화되었다. 베이스라인 자료의 경

*Corresponding author: bykim@kigam.re.kr

우 추가적으로 인위적인 잡음을 제거하고 층서 해석 결과를 통합하여 이산화탄소 지중저장 영역을 묘사한다면 시간 경과 모니터링 자료와의 효율적인 대비가 가능할 것이다.

주요어 : 탄성과 에너지, 유사도, 주파수 분해, 이산화탄소 지중저장

1. 서 론

경제적 및 환경적 목적으로 배출가스를 지하에 저장하는 CCS (Carbon Capture and Storage) 연구가 에너지자원 분야에서 활발하다. 노르웨이, 캐나다, 미국, 일본 호주 등 각국에서 고갈 유가스전과 대수층에 이산화탄소를 주입하고 평가한 대규모 프로젝트 사례가 있다. 캐나다의 경우 Weyburn/Midale 프로젝트를 진행하며 CCS 기술이 발달해 현재 실증 및 상용화 단계에 와있다. 2010년 시작된 캐나다의 Aquistore 연구 과정은 심부 염대수층을 대상으로 이산화탄소를 저장하는 대규모 실증 CCS 프로젝트이다. 국내 역시 이산화탄소 지중저장 실증화를 위하여 일련의 연구가 진행 중이며 동시에 국제 공동연구가 병행되고 있다. 본 연구는 Aquistore CCS 프로젝트에서 취득한 현장 탄성과 탐사 자료를 확보하여 이를 직접 분석함으로써, 국내 이산화탄소 지중저장의 실증화에 대비한 탄성과 모니터링 기술을 향상시키기 위한 토대를 마련하고자 수행되었다.

지하에 주입된 이산화탄소의 모니터링은 탄성과 탐사를 반복하는 시간경과 탐사로 가능하다 (Harris *et al.*, 2006; Pevzner, *et al.*, 2009). 성공적인 탄성과 모니터링을 위해서는 미리 목표지층의 특성을 파악할 필요가 있다. Aquistore 연구에서 이산화탄소 지중저장 대상

지층은 Williston Basin의 Winnipeg 층과 Deadwood 층이다 (PTRC, 2011). Winnipeg 층은 하부에 Black Island 층원이라 불리는 사암층이 존재하고 상부에는 셰일 기반의 Icebox 층원이 덮여 있어 저장복합체의 덮개암 역할을 한다. 하부의 Deadwood 층은 캐나다 남부에 지역적으로 넓게 분포하는 사암층이며 실트/셰일 협재층을 포함한다 (Seibel and Bend, 2000). 퇴적 매질의 특성과 구조를 파악하기 위해 다양한 탄성과 속성이 이용될 수 있는데 이 논문에서는 탄성과 에너지, 유사도, 주파수 분해 기법을 3차원 탄성과 자료에 적용하였다.

탄성과 에너지는 지하 매질의 반사 강도가 큰 경우 높게 나타나며 석유/가스 부존 등의 매질 반사계수가 급격히 변화하는 영역을 찾는데 이용된다 (Taner *et al.*, 1979; Chopra and Marfurt, 2005). 특히 셰일 덮개층 하부의 사암층은 상대적으로 임피던스가 크기 때문에 탄성과 에너지 속성이 크다 (Chopra and Alexeev, 2005). Aquistore 탄성과 자료의 경우 사암층 내에 셰일 협재층이 존재하므로 매질의 특성을 구분하는 속성으로 탄성과 에너지가 유용할 것이다. 퇴적 층서에서 단층 등의 불연속면을 포함하는 구조적인 특징을 파악하기 위하여 탄성과 유사도를 계산하였다 (Chen and Sidney, 1997; Parr and Marsh, 2000; Meldahl *et al.*, 2001). 유사도는 한 지점의 탄성과 기

Table 1. Acquisition parameters for Aquistore CCS baseline seismic survey.

Date of acquisition	March 2012	Source interval (m)	36
Recorded by	WG UniQ for Schlumberger Carbon Services	Source line spacing (m)	288
Total number of sources	2,411	Receiver interval (m)	6
Total number of detectors	18,097	Receiver line spacing (m)	288
Source type	X2 AHV-IV 62,000 lb Buggy Vibrators	Number of live lines	20
Sweep type	2-100 Hz Maximum Displacement	Stations per line	Varied
Receiver system	UniQ	Active stations	all
Geophone	Schlumberger GAC	Geophone Array	Single sensor
Sample Rate (ms)	2	Fold coverage	88
Record length (s)	5.0	Inline cell size (m)	3
Number of channels	18,097	Crossline cell size (m)	18

특을 인접 기록과 비교하는 방법으로 국지적 불연속면을 찾는 데 이용될 수 있다. 이산화탄소 지중저장 층의 불연속면을 확인하는 경우 주입 설계에 도움이 된다. 퇴적층의 수직 해상도를 고려한 해석에는 탄성과 기록 중 주파수 성분을 분해하는 방법이 효율적이다 (Peyton *et al.*, 1998; Partyka *et al.*, 1999). 주파수

를 분해하는 기술은 저주파 음영대를 찾는 데 중요한 정보를 제공하며 탄화수소 저류층을 분석하는데 빈번하게 적용되어 왔다 (Castagna *et al.*, 2003; Sinha *et al.*, 2005). 다양한 해상도로 탄성과자료를 해석할 수 있기 때문에 이러한 주파수 분해 방법은 CCS 연구에도 적용된다 (Chadwick *et al.*, 2010; Sparlin *et*

Fig. 1. Location of Williston Basin area and 3D seismic grid of Aquistore CCS project.

Fig. 2. Shot gathers of Aquistore seismic data.

al., 2010). Aquistore 프로젝트에서 취득한 탄성과 자료는 해상도가 높고 퇴적 층서에 대한 해석이 충분히 이루어졌으므로 주파수 분해 기술을 적용하기에 적합하다.

2. 연구지역 및 탄성파자료

Aquistore 연구 현장은 캐나다 Saskatchewan 주의 남동쪽 Estevan에 위치한다 (Fig. 1). Aquistore 프로젝트는 심부 대수층을 지중저장 대상으로 수 개월 간 하루 1,500 ~ 2,000 톤씩 총 30만 톤의 CO₂ 주입을 계획하고 있다. 3차원 탄성과 탐사는 2012년 수행되었고 탐사구역은 30 km²이다. 2,411개 음원이 36 m마다 존재하며 Buggy Vibrator가 이용되었다. 지오폰은 6 m 간격으로 배열되었고 총 18,097 채널이다. 음원과 수신기 배열은 각각 288 m 간격으로 설치되었다. 기타 탄성과 취득변수는 Table 1에 정리하였다.

취득된 자료는 전형적인 육상 탄성과 자료로 대표적인 공동발과점 모습도를 Fig. 2에 도시하였다. 탄성과 자료에서 확인되는 반사 신호들을 Estevan 지역의 지질 층서 해석 및 로깅 자료와 대비함으로써 주요한 반사파에 대한 해석이 이루어졌고 그 중 Winnipeg층과

Deadwood층이 이산화탄소 지중저장에 적합하다는 결론을 얻었다 (Table 2). 탄성과 자료의 해석은 반사 이벤트의 마루 (peak) 또는 골 (trough)을 선택하여

Table 2. List of interpreted horizons and seismic traveltime in Aquistore sediments (from Interpretation of 2D Seismic Data for the Aquistore Project near Estevan, Saskatchewan; RPS Boyd PetroSearch; Project Number 20111097)

Seismic Horizon	event	Time(ms)
Lower Colorado Marker	Peak	847
Mannville	Peak	992
Watrous	Peak	1209
Poplar (Mississippian)	Peak	1266
Bakken 1 Shale	Trough	1439
Bakken 2 Shale	Trough	1450
Birdbear	Peak	1483
Dawson bay	Peak	1585
Prairie Evaporite	Trough	1598
Winnipegosis	Peak	1668
Ashern/Interlake	Peak	1730
Winnipeg Fm Top	Trough	1815
Winnipeg Sand	Peak	1827
Deadwood Fm Top	Peak	1845
Deadwood B	Trough	1857
Precambrian	Peak	1906

Fig. 3. NMO corrected CDP gathers.

수행되었고 각 층들의 깊이는 탄성과단면 상에서 표에 기록된 시간에 부합한다. Fig. 3은 기본적인 전산처리와 정보정(static correction)을 적용한 자료를 일부 중심점 모음에서 중합 속도로 수직 동보정 (Normal Move-Out)한 결과이다. Table 2에 제시된 탄성과 해석 결과 중에서 Mannville, Mississippian, Prairie, Winnipeg 및 Deadwood 층에 대한 반사이벤트를 중심점 모음 탄성과기록에 표시하였다.

3. 탄성과 에너지 분석

수평층서가 뚜렷한 탄성과 자료를 중합하여 작성된 탄성과 볼륨의 중앙부에서 대표적인 단면을 추출하여 Aquistore 지하의 광역적인 구조를 확인하였다. Figs. 4a

와 4b는 탐사측선 중 종방향 (In-line) 번호 3800과 횡방향 (Cross-line) 번호 4602에 대한 중합단면도를 보여준다. 탄성과 단면에서 해석된 주요 층들은 수평적으로 연속하여 나타나며 탄성과 기록 시각 2.0 초 이전의 마루와 골에 대하여 해석결과에 부합하는 층들이 확인되었다. Figs. 4c와 4d는 탄성과 볼륨에서 왕복 주시 1,800 ms와 1,850 ms에서의 평면도 (time-slice)를 보여준다. 탄성과 시간 1,800 ms의 평면도에서 연구구역 중앙과 상부에 진한 황색으로 표시된 강한 양 (positive, +)의 반사신호가 위치한다 (Fig. 4c). 중앙부에서 동서 방향으로 청색 반사신호가 이어지고 북측 상부 경계에는 진한 청색의 보다 강한 음 (negative, -)의 반사신호가 확인된다. 탄성과 시간 1,850 ms의 수평 단면은 주변부에서 반사계수가 음수인 영역이

Fig. 4. Seismic stacked sections at (a) inline no. 3800 and (b) crossline no. 4602 and time slices at (c) t=1,800 ms and (d) t=1,850 ms.

1,800 ms의 단면보다 확장되었다 (Fig. 4d).

탄성과 에너지는 특정 시간간격 내에서 탄성과 기록의 진폭의 제곱의 합을 계산함으로써 얻어지는 속성이다. 상대적으로 반사계수가 큰 경우가 많은 사암 등의 지하 매질은 탄성과 에너지가 크다. 석유 가스 층과 같이 반사계수의 대비가 큰 영역은 명점 (bright spot)으로 나타나기도 한다. Aquistore 현장의 경우 유가스전을 포함하지 않으므로 퇴적 매질의 성분과 고결 상태에 따라 에너지 속성이 영향을 받을 것으로 유추된다. 중합자료에 대하여 에너지 속성을 계산한 결과 화살표로 나타낸 지중저장 대상층 위쪽 Mississippian 층에서 강한 에너지가 관찰되었다 (Fig. 5a). 이보다 심부에 위치하는 Deadwood 층은 상대적으로 에너지의

크기가 작고 위치에 따라 변화가 큰 양상을 보였다 (Fig. 5b). 이와 같은 특성은 공극이 적고 불균질한 퇴적층에서 주로 나타나며 이산화탄소 저장에 불리하다. 따라서 지하에 주입된 이산화탄소의 추적을 위하여 대상 층의 에너지 분포 양상을 심도에 따라 파악할 필요가 있다. Figs. 5c와 5d는 왕복주시 1,800 ms와 1,850 ms에서의 탄성과에너지 평면도이다. Winnipeg 층과 Deadwood 층 깊이인 1,800 ms와 1,850 ms의 탄성과에너지는 각각 연구지역 북쪽과 남쪽에 큰 값이 집중되었다 (Fig. 5c and Fig. 5d). 반사계수가 크고 균질한 사암 퇴적 매질이 Winnipeg 층의 경우 연구지역 북측, Deadwood 층의 경우 남측에 양호하게 분포할 것으로 유추되고 시추공 또는 지질자료와의 대비

Fig. 5. Trace energy attribute of Aquistore seismic data displayed in (a) volume with high energy indicated by arrows, (b) volume with the time slice near injection depth, (c) time slice at the top of the Winnipeg Formation ($t=1,800$ ms) and (d) time slice at the top of the Deadwood Formation ($t = 1,850$ ms).

가 필요하다. 해당 영역의 지하 매질이 사암이 우세한 퇴적성분으로 분석되는 경우 이산화탄소의 지중저장에 유리할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 유사도 분석

유사도 속성은 인접 탄성과 기록과의 비교를 통해 도출되는데 이를 출력하면 단층이나 불연속면과 같은 공간적인 단절현상을 쉽게 인지할 수 있다. Aquistore 탄성과 자료로부터 지중저장 공간의 연장성을 검토하기 위하여 탄성과 수평단면의 유사도를 계산하고 도시하였다(Fig. 6). Winnipeg 층의 상부 심도인 1,800 ms의 유사도 단면에서 전산 처리 잡음으로 판단되는 검은색 반점 형태의 낮은 값이 존재하지만 전체적으로 유사도가 크고 연결성이 양호하다 (Fig. 6a). Deadwood

층의 상부 심도인 1,850 ms 수평단면의 유사도 계산 결과 Fig. 6b에서 화살표로 표시된 유사도가 낮은 영역이 남북방향으로 존재하였다. 유사성이 낮은 이유는 경사층리, 단층 등의 지질적 불연속성에서 비롯되거나 매질특성 변화, 인위적 잡음 때문일 수 있다. 향후 해석결과를 이용하여 등시간 평면도와 등층후 평면도를 동시에 비교하면 구조선의 여부에 대한 신뢰성 있는 판단이 가능할 것이다. Precambrian 층의 상부 심도인 1,900 ms 수평 단면의 유사도를 출력한 결과 관심 영역 중앙부에 검은색 화살표로 표시된 유사도가 낮은 영역이 확인되었다 (Fig. 6c). 1,950 ms의 수평단면을 확인한 결과 탐사지역 북동쪽에서 유사도가 낮게 나타나는데 유의미한 연장성을 찾기 어려우므로 뚜렷한 단층 또는 구조선이라고 규정하기 어렵다 (Fig. 6d). 지하에 주입된 이산화탄소는 퇴적양상의 변화가 적은 영

Fig. 6. Time slice of similarity attribute at (a) 1,800 ms, (b) 1,850 ms, arrows represent possible geological discontinuity, (c) 1,900 ms and (d) 1,950 ms.

역을 따라 확산될 가능성이 높다. 탄성파 자료에서 유사도가 큰 경우 퇴적양상의 변화가 적다고 유추할 수 있고 따라서 Aquistore 탄성파 자료에서 높은 유사성을 보이는 영역이 주입된 이산화탄소가 집적되기 유리한 공간분포로 예측할 수 있다.

5. 주파수 분해 분석

Aquistore 이산화탄소 저장층의 두께 또는 덮개층의 위치를 확인하기 위해서는 탄성파 자료를 주파수별로 분리하여 도시하는 연구가 적합하다. 지층에서 반사되는 탄성파는 파장의 1/4 규모의 수직 해상도를 가지므로 두께가 다른 퇴적 층은 다른 주파수 성분으로 나타나기 때문이다. 주파수를 분리하여 분석하는 경우, 두꺼운 층은 저주파 성분에서, 두께가 얇고 미세한 층서는 고주파 성분에서 뚜렷하다. Aquistore 연구지역의

탄성파자료 중 Deadwood 층 심도인 1,884 ms의 수평단면에 대하여 낮은 주파수, 중간 주파수 및 높은 주파수의 성분을 각각 추출하여 Fig. 7에 도시하였다. 저주파인 5 Hz의 성분을 붉은 색상으로 도시한 결과 탐사 지역의 북부 및 경계 위치에 다수의 신호가 집중되었다 (Fig. 7a). 중간 주파수인 20 Hz 성분은 남쪽과 북쪽에 주로 분포하고 화살표로 표시된 탐사영역 중앙에서 희박하였다 (Fig. 7b). 이는 동서 방향으로 불균질한 퇴적매질이 분포하고 북쪽에 비해 퇴적층의 두께가 얇아짐을 의미할 수 있다. 상대적으로 고주파인 40 Hz 주파수 성분은 청색으로 도시되었고 탐사지역 남쪽에서 진한 청색이 우세하다 (Fig. 7c). 세 가지의 주파수 성분을 도시한 결과 Deadwood 층은 북쪽에서 두껍고 탐사지역 중앙에서 얇게 퇴적된 것으로 판단된다. 두께가 다른 층의 공간적인 분포를 확인하기 위하여 각 주파수별 성분들을 함께 도시하였다

Fig. 7. Spectral decomposition results with the frequency of (a) 5 Hz, (b) 20 Hz, (c) 40 Hz and (d) all of those frequencies.

Fig. 8. Spectral decomposition results superimposed on the seismic data. (a) The seismic time slice only at 1,884 ms, (b) decomposed 5 Hz frequency slice is superimposed on the seismic time slice, (c) decomposed 5 Hz and 20 Hz frequency slices are superimposed on the seismic time slice and (d) decomposed 5 Hz, 20 Hz and 40 Hz frequency slices are superimposed on the seismic time slice.

(Fig. 7d). 적색-녹색, 녹색-청색 및 청색-적색의 중간성분은 각각 노란색, 밝은 파랑, 분홍색으로 나타났다. 탐사지역 북쪽에서 북서-남동 방향으로 이어진 노란색 영역과 동서방향으로 넓은 띠 형태를 이루는 분홍색 영역은 상대적으로 낮은 주파수와 높은 주파수가 각각 우세한 영역이다. 이산화탄소 지중저장 대상 층서는 북쪽에서 두껍고 탐사영역 중앙부에서 동서방향으로 이질적인 퇴적매질이 존재함을 확인할 수 있었다.

탄성과 기록과 주파수별 성분의 공간분포를 함께 도시할 수 있는데, 먼저 1,884 ms 탄성과 수직단면을 Fig. 8a에 나타내었다. 탄성과 반사 신호의 마루와 골은 각각 청색 및 적색으로 표시되었다. 탄성과자료와 5 Hz 주파수 자료를 함께 도시함으로써 저주파 신호

에 부합하는 두꺼운 퇴적 층서가 배경 매질로 탐사영역에 광역적으로 분포함이 확인된다 (Fig. 8b). 탄성과자료와 5 Hz 및 20 Hz 주파수 성분을 함께 도시한 단면은 Fig 8c와 같고 상대적으로 낮은 주파수 성분이 연구지역 남쪽, 북쪽에 분리되어 강조되었다. Fig. 8d는 탄성과자료와 5, 20 및 40 Hz 주파수 성분을 함께 도시한 결과이다. 이산화탄소 주입 시 1,884 ms 깊이에서 동서 방향으로 이동 가능성이 높을 것으로 보이며 시간 경과 탄성과자료를 이용한 지속적인 분석이 필요하다. 원칙적인 Spectral Decomposition 분석은 해석된 수평층에 대하여 적용되며 본 연구에서는 해석결과가 통합되기 전 단계에서 등시선도 탄성과 단면의 주파수를 분해하여 분석하였다. 이산화탄소 주입

후의 탄성파자료에서 변화가 뚜렷한 주파수 성분을 찾는 경우 공간적인 이산화탄소 분포를 모니터링하는데 도움이 될 것이다.

6. 결 론

캐나다 Aquistore 이산화탄소 지중저장 현장 탄성파 탐사 자료의 중합 단면과 탄성파 에너지, 유사도 및 주파수 성분을 분석하여 퇴적 매질 특성과 구조적 변화 양상에 대해 고찰하였다. 이산화탄소 지중저장을 목표하는 지층은 Winnipeg와 Deadwood 층으로 탄성파 도달 시각 1,800 ms와 1,900 ms 사이에 위치한다. 탄성파 에너지 속성을 도시한 결과 사암이 우세한 높은 반사계수의 영역이 지중저장 관심구간 상부의 경우 북쪽, 하부의 경우 남쪽에 집중되었다. Winnipeg 층을 남북으로 가로지르는 유사도가 낮은 영역이 1,850 ms 깊이에서 확인되었다. 탄성파 자료의 심도에 따른 유사도 분석으로 파악된 불연속 구간에서는 주입된 이산화탄소의 유동이 제한적일 수 있다. 주파수 성분 중 5, 20 및 40 Hz를 추출하여 도시함으로써 Deadwood 층이 연구지역 북쪽에서 두껍게 나타났다. 탄성파자료와 주파수 성분을 겹치게 도시한 결과 상대적으로 얇고 이질적인 퇴적 매질이 동서 방향으로 발달함을 확인하였다. 탄성파 단면에서 해석한 반사면에 대하여 spectral decomposition 분석을 수행할 경우 보다 입체적인 지형변화가 나타날 가능성이 있다. 본 연구에서는 중합 후 탄성파 자료를 검토하여 Aquistore 현장 이산화탄소 주입구간의 퇴적매질 분포 특성과 구조 변화를 분석하였다. 향후 신뢰성 있는 해석결과를 통합하고 시간경과 탄성파자료를 분석한다면 지중에 저장된 이산화탄소의 모니터링에 도움이 될 것이다.

사 사

이 논문은 “캐나다 CCS 실증 프로젝트 참여를 통한 이산화탄소 지중저장 실증 기술 개발” 연구의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 논문의 심사를 맡아주신 심사위원께 감사 드립니다.

참고문헌

- Castagna, J.P., Sun, S. and Siegfried, R.W. (2003) Instantaneous spectral analysis: Detection of low frequency shadows associated with hydrocarbons. *The Leading Edge*, v.22, p.120-127.
- Chadwick, A., Williams, G., Delepine, N., Clochard, V., Labat, K., Sturton, S., Buddensiek, M., Dillen, M., Nickel, M., Lima, A.L., Arts, R., Neele, F. and Rossi, G. (2010) Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO₂ storage operation. *The Leading Edge*, v.29, p.196-199.
- Chen, Q. and Sydney, S. (1997) Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring. *The Leading Edge*, v.16, p.445-456.
- Chopra, S. and Alexeev, V. (2005) Application of texture attributes to 3D seismic data. *CSEG recorder*, v.30, p.28-32.
- Chopra, S. and Marfurt, K. (2005) 75th Anniversary-Seismic attributes- A historical perspective. *Geophysics*, v.70, p.3S0-28S0.
- Harris, J.M., Quan, Y., Xu, C. and Urban, J. (2006) Seismic monitoring of CO₂ sequestration. GCEP technical report.
- Meldahl, P., Heggland, R., Bril, B. and Groot, P. (2001) Identifying faults and gas chimneys using multi-attributes and neural networks. *The Leading Edge*, v.20, p.474-482.
- Parr, R.S. and Marsh, M. (2000) Development of 4-D reservoir management West of Shetland. *World Oil*, p.39-47.
- Partyka, G., Gridley, J. and Lopez, J. (1999) Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, v.18, p.353-360.
- Pevzner, R., Shulakova, V., Kepic, A., Al-Jabri, Y. and Urosevic, M. (2009) Repeatability of land time-lapse seismic surveys- Otway project 2D test line case study. 71st EAGE conference & exhibition inc. SPE EUROPEC.
- Peyton, L., Bottjer, R. and Partyka, G. (1998) Interpretation of incised valleys using new 3-D seismic techniques: A case history using spectral decomposition and coherency. *The Leading Edge*, v.17, p.1294-1298.
- PTRC (2011) Interpretation of 2D seismic data for Aquistore project near Estevan, Saskatchewan. Project report 20111097.
- Seibel, C. and Bend, S. (2000) An examination of the hydrocarbon-generating potential of the Deadwood formation and Black Island member, Winnipeg formation, Saskatchewan. Saskatchewan Geological Survey, Sask. Energy Mines, Misc. Rep. 2000-4.1., v.1, p.14-20.
- Sinha, S., Routh, P.S., Anno, P.D. and Castagna, J.P. (2005) Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*, v.70, p.19-25.
- Sparlin, M., Meyer, J., Bevc, D., Cabrera, R., Hibbitts, T. and Rogers, J. (2010) Seismic analysis and characterization of a brine reservoir for CO₂ sequestration. SEG international exposition and 80th annual meeting, Denver.
- Taner, M.T., Koehler, F. and Sheriff, R.E. (1979) Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, v.44, p.1041-1063.

2013년 6월 27일 원고접수, 2013년 8월 29일 1차수정, 2013년 11월 23일 게재승인