

영일만 해상 포항분지 소규모 CO₂ 지중저장 실증을 위한 부지 탐사 결과

신영재¹ · 권이균² · 윤종렬³ · 김병엽¹ · 정순홍^{1*}

¹한국지질자원연구원, ²국립공주대학교 지질환경과학과, ³(주)테라이지

Result of CO₂ Geological Storage Site Survey for Small-scale Demonstration in Pohang Basin, Yeongil Bay, SE Korea

Young Jae Shinn¹ · Yi Kyun Kwon² · Jong-Ryeol Yoon³ · Byoung-Yeop Kim¹ · Snons Cheong^{1*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

³TerraEG Co., Ltd.

Abstract

CO₂ storage site for small-scale demonstration has been investigated in Yeongil Bay, Pohang, SE Korea, using seismic survey and exploration well data. We found a potential storage formation consisting mainly of conglomerate and sandstone. The storage formation unconformably overlies volcanic basement rocks that are located in a depth from 650 to 950 m (below sea level). The depth of the storage formation is suitable for injecting supercritical CO₂ in the Pohang Basin. The average thickness of the storage formation is about 123 m, which possibly provides sufficient capacity at the level of small-scale storage demonstration. The overlying fine-grained deposits consist mainly of marine hemipelagic muds and interlayered turbidite sands. The overlying formation is considered as a good seal rock that is over 600 m thick and widely distributed in the onshore and offshore portions of the basin. NNE-trending faults found in the study area likely formed at basement level, probably not continue to seafloor. Such faults are interpreted as syndepositional faults involved to the basin initiation. This study reveals that the offshore area of the Pohang Basin contains deep geological formations suitable for small-scale CO₂ storage demonstration.

Keywords: CO₂ geological storage, small-scale demonstration, Pohang Basin, site characterization, seismic survey

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Snons Cheong
E-mail: snons@kigam.re.kr

Received: 11 May, 2018

Revised: 6 June, 2018

Accepted: 11 June, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



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.

초 록

소규모 이산화탄소 주입 실증 부지를 탐색하기 위해 포항분지 영일만 연안에서 취득한 탄성파 탐사와 시추 자료를 분석하였다. 연구지역에서 기반암은 해수면 기준 심도 650~950 m에 분포하며, 상부에 사암과 역암이 우세한 퇴적층이 발달한다. 이 퇴적층은 대부분 포항분지에서 이산화탄소가 초임계 상태로 존재할 수 있는 심도(약 740 m)보다 깊은 곳에 분포한다. 또한 평균 두께가 123 m로 저장능력이 양호할 것으로 여겨진다. 상부에 올라오는 이암층은 대개 600 m 이상 두껍고 육상과 해상의 포항분지에 광역적으로 분포하고 있어 덮개 능력이 양호할 것이다. 연구지역에 발달하는 북북동 방향의 단층들은 기반암 심도에서 주로 발달하는 퇴적동시성 단층으로 수직 연장성이 불량할 것으로 해석된다. 본 연구를 통해 영일만에 위치한 포항분지 심부에서 소규모 실증에 적합한 저장층과 덮개층이 분포하고 있음을 제시하였다.

주요어: 이산화탄소 지중저장, 소규모 실증, 포항분지, 부지 특성화, 탄성파 탐사

서론

산업화 이후에 화석연료의 사용이 급격히 증가하면서 이산화탄소의 대기 중 농도는 지속적으로 증가하는 추세이다. 급격한 기후변화를 피하기 위해 다양한 방법으로 이산화탄소를 저감하기 위한 노력들이 전 세계적으로 계속되고 있다. 이산화탄소를 대규모 저감하는 기술로 이산화탄소를 포집하여 지하 심부에 저장하는 방법(CCS, CO₂ capture and storage)이 가장 유력하게 고려되고 있다(Holloway, 1997; Metz et al., 2005). 이산화탄소 지중저장 기술은 석유가스 자원의 회수증진을 위해 저류층에 이산화탄소의 주입 및 저장이 이용되면서 시작되었다(Orr and Taber, 1984). 이후 지중저장 기술은 탄화수소 저류층 외에 대수층에 대규모로 이산화탄소를 저장하고 모니터링하는 영역으로 확대되었다(Kongsjorden et al., 1998). 특히, 북해의 슬라이프너(Sleipner) 프로젝트를 통해 대규모 이산화탄소 저장 및 모니터링 연구 결과가 성공적으로 발표되면서 관련 연구 사례가 육상과 해상의 실증 부지에서 지속적으로 축적될 수 있었다.

국내에서도 이산화탄소 지중저장 기술에 대한 연구개발과 중·소규모 실증 프로젝트가 활발히 수행 중이다. 한국지질자원연구원을 중심으로 한 연구개발팀은 국내 퇴적분지를 다년간 조사하여 해양에서의 이산화탄소 지중저장 실증 유망 부지로 북평분지, 포항분지 등을 제시하였다(Kihm and Kim, 2013; KIGAM, 2014). 이후 최종적으로 포항분지 영일만 해상 지역을 소규모 이산화탄소 주입 실증부지로 선정하기 위한 조사/탐사를 시작으로 이산화탄소 지중저장 실증 프로젝트가 2013년부터 시작되었다. 2017년 영일만 해상 주입 플랫폼에서 소규모 이산화탄소 시험 주입을 성공적으로 수행하였고(Kwon, 2017), 현재는 중규모 이산화탄소 저장 실증을 위한 연구개발이 진행 중이다.

본 연구가 수행되기 전에 영일만 해상에 분포하는 포항분지는 육상에 분포하는 해성 퇴적층이 연장되어 분포할 것으로 예상되었다. 그러나 지구물리 탐사나 시추 자료가 거의 없었기 때문에 퇴적층의 두께와 기반암의 심도에 대한 정보가 전무하였다. 이산화탄소를 지중저장하기 위한 선결조건으로 초임계 상태의 이산화탄소 주입이 가능한 심도(> 31.1°C, > 73.8 bar)에 적절한 저장압과 덮개암이 존재해야 한다. 영일만 해상에서 이러한 조건을 만족하는 부지를 조사하기 위해 2차원 탄성파 탐사를 수행하였고, 탐사공(PHEW-1)을 시추하여 전 구간 코어를 회수하였다. 본 연구에서는 영일만 해상 포항분지에서 소규모 이산화탄소 지중저장이 가능한 부지를 선정하기 위한 탄성파 탐사 및 시추 결과를 소개하고자 한다.

연구지역

한반도 남서부 포항시 지역에 분포하는 포항분지는 백악기 경상누층군 또는 에오세 전기에서 중기의 화산암류를 덮고 있는 해성 퇴적물로 구성된다(Fig. 1) (Yoon, 1975; Chough et al., 1990; Byun and Yun, 1992; Noh, 1994; Lee et al., 2009). 분지 충전물은 주로 전기 마이오세 말(약 17 Ma)에서 중기 마이오세 말(약 10 Ma) 사이에 형성되었고, 분지의 서부는 선상지-삼각주계 천해환경이 우세하고, 동편으로 갈수록 깊은 해양성 환경으로 퇴적환경이 변화한다(Yoon, 1975; Chough et al., 1990; Byun and Yun, 1992; Noh, 1994; Lee et al., 2009). 분지 서쪽 경계를 따라 중첩되어 발달하는 선상지-삼각주계는 주로 역암, 역질사암, 사암으로 구성되어 있다(Hwang et al., 1995). 해양성 부유 퇴적물로 구성된 이암들은 분지 동편으로 분포가 넓어지며 두꺼워진다(Fig. 1). 이암들 내에는 간헐적으로 저탁류 사암들이 협재하는 것이 특징이다(Hwang, 1993; Sohn et al., 2001). 기존 연구들에 의하면 포항분지는 양산단층의 우수향 주향이동단층운동에 의한 당겨열림형 분지로 해석되었다(Han et al., 1987; Yoon and Chough, 1995). 그러나 일부 학자들은 포항분지가 양산단층의

운동과 무관하게 분지의 서쪽 경계를 따라서 정단층 활동에 의해 발달하였으며, 서쪽 경계는 양산단층의 동쪽으로 2~3 km 떨어진 지그재그 형으로 분절된 정단층과 이음단층(transfer fault)으로 구성됨을 보고하였다(Fig. 1) (Sohn and Son, 2004; Cheon et al., 2012; Son et al., 2013).

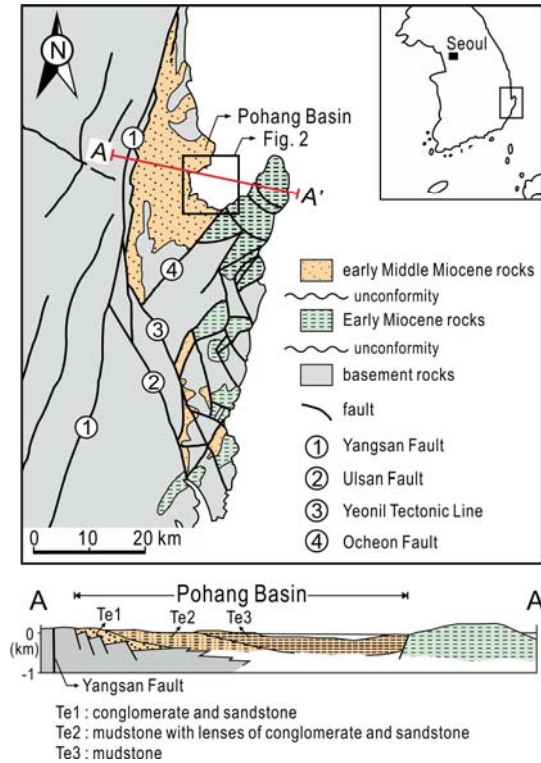


Fig. 1. Geological map of the southeastern part of Korea, showing Tertiary sedimentary basins and major faults (modified from Sohn and Son, 2004). A geological cross-section shows eastward-deepening geometry of the Pohang Basin.

연구지역은 포항시 영일만 일대에 분포한 포항분지로서 육상에 주로 드러난 선상지-삼각주계의 횡적 연장부로 깊은 해양성 이암들이 퇴적되었을 것으로 예측된다. 인접한 육상에서 석유탐사 및 지열개발을 목적으로 시추한 코어 자료들을 분석한 결과에 의하면 육상의 기반암들은 심도가 110~875 m에 분포하며, 서쪽에서 동쪽으로 점진적으로 깊어지는 경향을 보인다(Lee et al., 2009; Song et al., 2015). 최근 한국지질자원연구원은 이산화탄소 지중저장 가능성 평가를 위해 육상에서 PHCLH-1 공을 시추하였다(Fig. 2) (KIGAM, 2014). 시추코어의 역암, 사암, 이암의 공극률은 20~35%로 유사한 값을 보이지만 투수율의 경우 역암 및 사암은 111~136 mD로 양호하고, 이암은 0.01~0.4 mD로 상대적으로 낮은 것으로 보고되었다(Han et al., 2012; Kim, 2013; KIGAM, 2014). Kim et al. (2013)은 동일한 시추공 코어시료의 물리적, 역학적 성질을 실내시험을 통해 측정하고 상관관계를 분석하여 역학적 안정성 분석에 필요한 인자를 제시하였다. 포항지역의 지구구배 평균값, 연평균지면온도를 고려하고, 심도에 따른 압력을 정수압으로 가정할 경우 이산화탄소 임계점을 초과하는 심도는 740 m로 산출되었다(Song et al., 2015). 포항분지 육상의 시추 및 지표 지질자료를 바탕으로 포항분지 육상에서 지질학적, 물리·화학적 조건들을 만족하는 이산화탄소 지중저장 유망 후보지 3개 지점이 제안된 바 있다(Song et al., 2015).

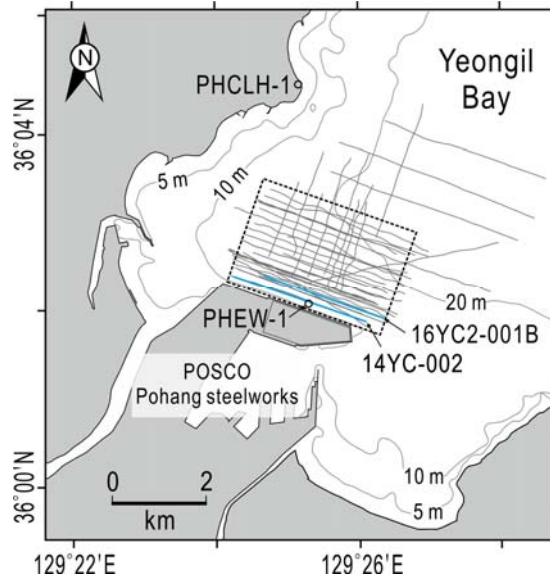


Fig. 2. Locations of 2D seismic survey lines and PHEW-1 and PHCLH-1 boreholes. A box with dashed lines indicates the boundary of structure map in Figure 10.

연구방법 및 자료

탄성파 탐사자료

연구 지역에서 소규모 이산화탄소 주입을 위한 부지 탐색과 시간경과 탄성파 모니터링 기술 개발을 위해 2D/3D 탄성파 탐사를 수행하였다(Fig. 2). 2차원 탄성파 탐사자료는 2013년 11월, 2014년 10월, 2015년 3월까지 3차례, OBS(Ocean Bottom Sensor) 노드를 이용한 유사-3차원(pseudo 3D) 자료는 2016년에 한국지질자원연구원의 물리탐사선 탐해2호를 통해 취득되었다. 탄성파 탐사는 지구물리적 탐사기법 중 해저면에서 지하 수 km 내외의 지층을 가장 고해상도로 영상화할 수 있으므로 실증 부지선정에 적합하다고 판단하였다.

탄성파 신호를 인위적으로 발생시키고 반사된 신호를 받는 자료취득 장비인 음원과 수신기로는 에어건(air-gun)과 스트리머(streamer)를 이용하였다. 천해 탐사의 경우 일반적으로 작은 탐사선에서 고주파 탐사자료를 취득할 수 있는 Sparker 또는 CHIRP(Compressed High Intensity Radar Pulse) 탐사를 수행한다. 포항분지 이산화탄소 지중저장 연구의 경우 임계 압력을 확보할 수 있는 지하 심부 저장층 확보가 목적이므로 투과력이 높은 저주파 음원인 에어건을 사용하였다. 반사신호 기록의 경우 수신기 채널 수가 많을수록 신호-대-잡음비(signal to noise ratio)가 높은 자료를 기록할 수 있는 장점이 있지만, 탐사 현장이 영일만 항내에 위치하므로 상선 및 어선 통행으로 탐사선 운용에 제약이 있었다. 따라서 천해 특성과 항내 환경을 고려하여 짧은 스트리머를 이용하였고 아울러 음원-수진기 간격(offset, 벌림거리)을 좁게 유지하였다(Fig. 3). 2D 탄성파 탐사를 위해 음원, 향측 및 기록 부분에서 각각 현장탐사에 최적화 되도록 설계한 취득 변수는 Table 1과 같다.

탄성파 탐사측선의 설계는 포항분지의 지질구조선의 기존해석결과를 토대로 동서방향 110°와 남북방향 290°주향으로 설정하였다. 영일만 내의 접안시설 및 방파제와 일정한 거리를 두어 탐사가 안전하게 수행되는 최대한의 영역에서 탐사한 결과 동서방향 측선은 3.1 km 연장으로 자료가 취득되었다(Fig. 2). 취득된 2D 탄성파 자료는 기본적인 전산처리를 적용하여 지하구조를 영상화하는 단면으로 출력되었다. 기본전산처리 단면들을 광역 해석에 이용하고, 지질 특성화를 위해 해상도 제고가 필요한 측선에 대하여 추가적인 자료처리를 적용하여 최종적으로 탄성파 탐사자료를 지하구조 단면으로 도출하였다.

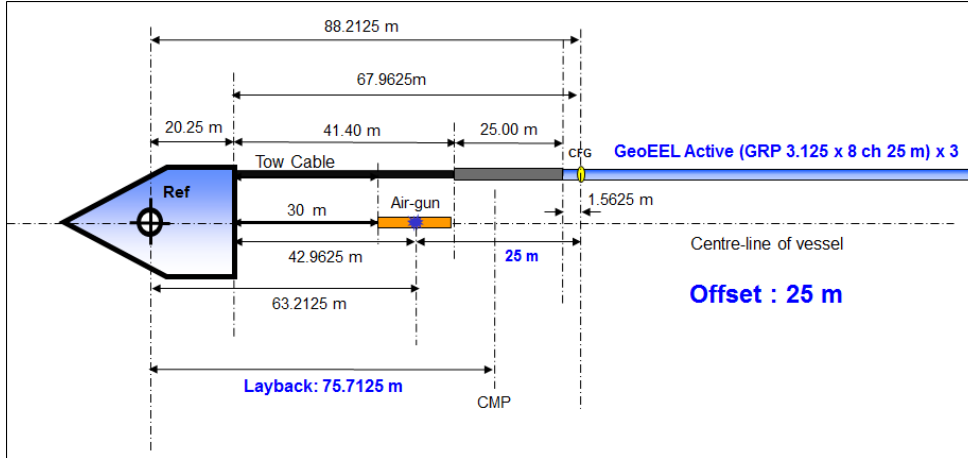


Fig. 3. Seismic equipment layout and acquisition geometry (not to scale).

Table 1. Seismic acquisition parameters.

General information			
Location	Youngil Bay, Pohang, SE Korea		
Vessel	R/V Tamhae II (KIGAM)		
Date of 1st Survey	2013.11.10. ~ 2013.11.15.		
Date of 2nd Survey	2014.09.30. ~ 2014.10.02.		
Date of 3rd Survey	2015.03.25. ~ 2015.03.27.		
Date of 4th Survey	2015.07.07. ~ 2015.07.11.		
Date of 5th Survey	2016.03.29. ~ 2016.03.31.		
Date of 6th Survey	2016.09.22. ~ 2016.09.23.		
Date of 7th Survey	2018.03.20. ~ 2018.03.24.		
Streamer Parameters			
Streamer type	GeoEEL	Number of streamer	1
Streamer length (m)	75.0	Number of channel	24/32
Group interval (m)	3.125	Streamer depth (m)	1.0±0.5
Offset (COS to CFG, m)	25.0	Distance VRP-CFG (m)	89.15
Recording Parameters			
Instrument type	Geometrics	Bandwidth	5 Hz to 3 kHz
Record length (s)	2.0	Low-cut filter	10±0.5 Hz
Sample rate (ms)	0.25	Tape format	SEG-D
Source Parameters			
Source type	Bolt Air-gun	Volume per source (in ³)	90/269/754/1254
Number of source	1	Source pressure (psi)	2,000
Sub-array number	1/2/3/4	Source length (m)	15.0
Shot point interval (m)	6.25/12.5	Source depth (m)	5.0±1.0

탐사 시추 자료

영일만 해상에서 대상 저장층의 두께 및 심도, 기반암의 심도 등을 파악하기 위해 탐사공(PHEW-1)을 시추하였다. 탐

사공 시추 위치는 탄성파 탐사 자료에 근거하였고, 영일만 항내 정박지, 항로 등을 고려하여 결정하였다. 탐사공은 포항 신흥 북쪽 포스코 부지 해양 안벽에서 약 120 m 이격된 지점의 공유수면에 위치한다(Fig. 2). 시추 위치에서의 수심은 15.5 m, 시추 위치의 좌표는 36°02'06"N, 129°25'24.13"E이고, 총 굴진 심도는 해저면에서부터 979.5 m이다(Fig. 4). 시추는 SEP 바지(barge)를 해상에 고정시킨 후 상단에 시추기를 설치하여 2014년 10월 31일부터 2015년 1월 21일 동안 수행되었다. 원활한 굴진을 위해 상부(0~700 m) 구간은 HQ(공경 96.0 mm), 하부(700~979.5 m) 구간은 NQ(공경 75.8 mm) 공경으로 굴진하였다(Fig. 4). 전체 굴진 구간에서 퇴적층 코어를 회수하였고, 공주대학교에서 퇴적상, 퇴적상조합, 퇴적환경 분석을 수행하였다.

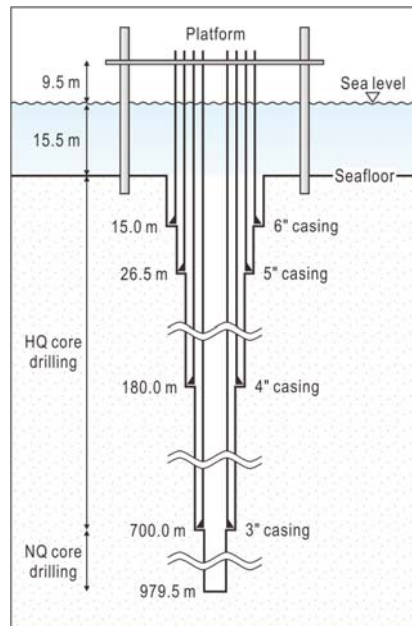


Fig. 4. PHEW-1 borehole design and geometry (not to scale). For the location of PHEW-1 borehole, see Figure 2. Note that casing depths are depths below seafloor.

결과 및 토의

탄성파 자료처리

탄성파 자료처리는 지하구조를 시각적으로 해석할 수 있는 단면 또는 입체부피로 가공하는 과정이다. 본 연구의 2D 탄성파 자료처리는 천해 환경에서 비롯하는 다중반사파(multiple reflection)의 제거와 짧은 스트리머로 기록하여 야기된 낮은 신호-대-잡음비 기록의 품질 향상에 주안점을 두고 수행되었다. 자료처리 공정은 연차별로 취득한 탄성파 자료에 대해 반복적으로 시험하여 최적의 조합을 다음과 같이 도출하였다.

현장에서 취득된 탄성파 기록은 위성신호로부터 계산된 항측 기록이 추가되어 정확한 위치의 탄성파 자료를 생성한다. 그리고 탄성파 기록 중 썩기형 잡음을 필터를 통하여 억제하였다. 주파수대역 필터와 표면파억제 필터를 순차적으로 적용하여 반사신호에 포함된 배경잡음을 제거하였다. 추가로 라돈(Radon) 필터를 이용하여 수평정렬되는 신호의 연속성을 향상시키고 수직시간차보정 및 겹쌓기를 수행하였다. 최종 단계에서는 겹쌓기 후 유한차분 구조보정을 적용하였다(Table 2).

Table 2. Data processing procedure and parameters.

Procedure	Parameters
Data input	SEG-D & UKOOA input
Geometry assignment	applied from field report and GPS coordinates
Noisy trace editing	despike standard deviation 0.0-3.0
Surface wave noise attenuation	velocity 1,480 m/s, frequency 50-200 Hz
Radon filter	number of P 51, range of P - 100 to 250 ms
NMO-stack	semblance RMS pick
Migration	fast explicit FD migration, 100 Hz

잡음을 억제하기 위한 자료처리 적용 전후 탄성파 음원모음을 확인하여 품질 향상을 검증하였다. 필터링 결과 탄성파 기록시간 0.3~0.8초 구간에서 반사신호의 연속성이 증가함을 확인할 수 있었다(Fig. 5). 잡음이 제거되어 해상도가 향상된 음원모음을 이용하여 수직시간차보정 속도(Normal - Move-Out velocity)를 도출하였고, 겹쌓기 및 추가적인 구조보정에 이용하였다(Fig. 6).

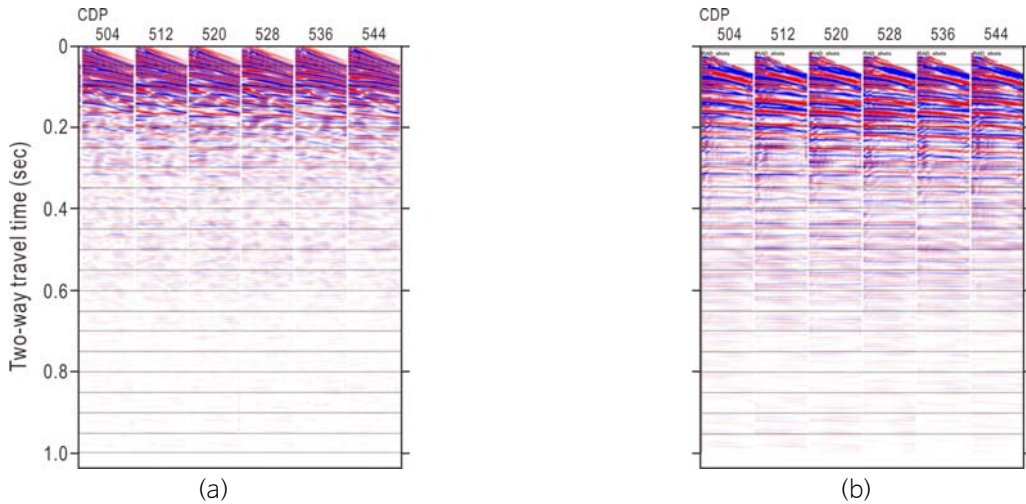


Fig. 5. Sample shots with CDP number before (a) and after (b) data quality enhancement process. CDP: common depth point.

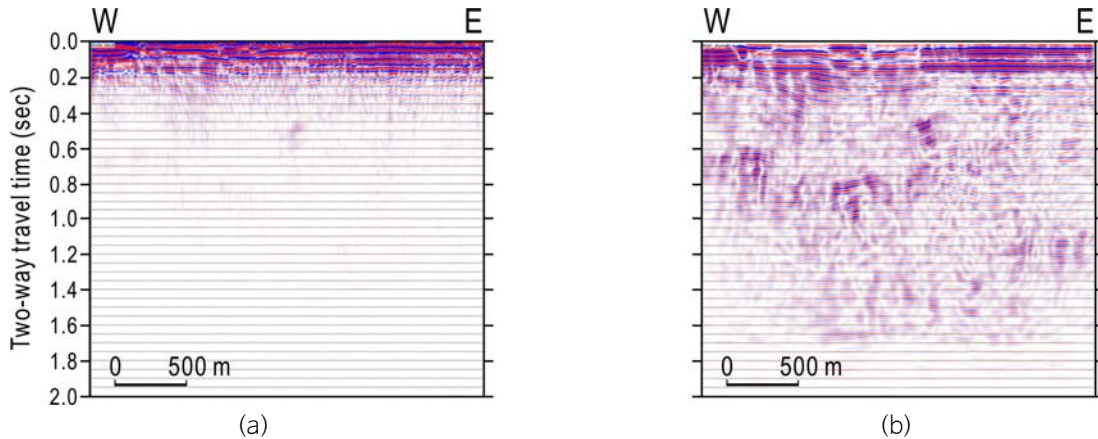


Fig. 6. Seismic sections of 16YC2-001B before (a) and after (b) data quality enhancement process. For the location of the section, see Figure 2.

포항분지의 지열구배와 정수압 조건을 고려할 때 자료처리에서 영상화하고자 하는 이산화탄소 주입 구간은 최소 심도 740 m 이상 깊은 심부이며(Song et al., 2015), 탄성파 단면에서 왕복주시(two-way travel time) 0.8초로 예상되었다. 자료 처리와 구조보정된 탄성파 단면은 음향기반암, 단층, 습곡구조 등 다수의 지하구조를 영상화하여 지질 특성화에 이용가능한 해상도를 확보하였다(Fig. 7). 대표 축선의 단면 영상을 도출한 자료처리 공정이 전체 탐사측선을 대상으로 적용되었고 최종 결과는 표준단면 호환형식인 SEG-Y로 출력되었다.

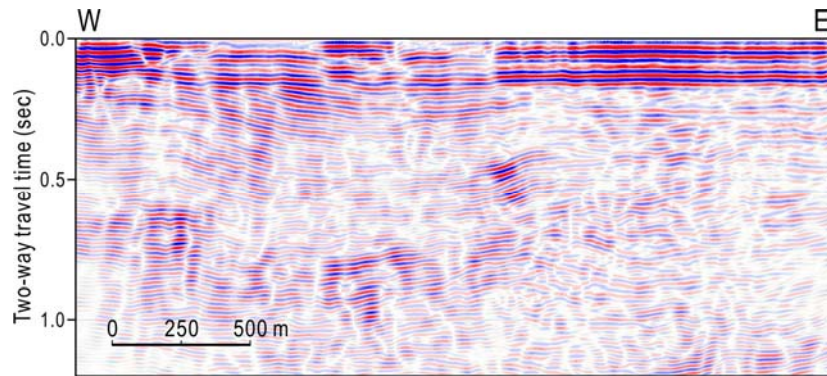


Fig. 7. A final processed seismic section (16YC2-001B). For the location of the section, see Figure 2.

시추코어 암상

영일만 해상의 포항분지에서 취득한 시추코어에서 기반암은 855.5 m 하부에 분포하는 화산암으로 해석되었다(Fig. 8). 기반암 상부에 두꺼운(약 30 m) 역암층이 올라오고 점진적으로 역암과 사암의 교호층과 이암층으로 상향세립화하는 경향이 나타난다. 심도 약 800 m 상부에 다시 역암, 사암, 이암의 교호층이 우세한 구간이 나타나고 다시 사암층이 우세한 구간이 발달한다. 심도 약 735.7 m에서 해저면 사이의 지층은 이암층이 우세하고, 간헐적으로 사암층이 협재하는 것이 특징이다.

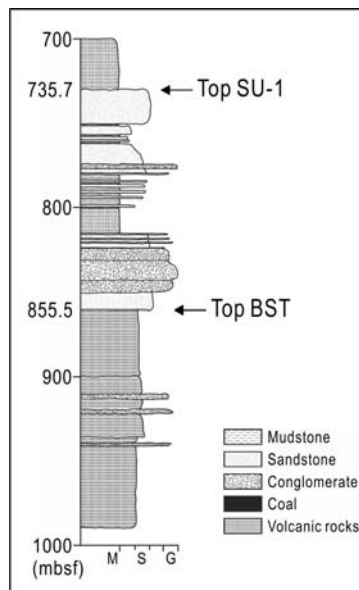


Fig. 8. Lithologic log of PHEW-1 borehole. For the location of PHEW-1 borehole, see Figure 2. BST: basement, mbsf: meter below seafloor, SU: seismic unit.

기반암 직상부에 올라오는 역암과 사암은 하성환경 혹은 상부 삼각주 평원(upper delta plain)에서 퇴적된 조립질 퇴적층으로 해석된다. 수심이 점진적으로 깊어지면서 이암층이 발달하고, 다시 삼각주 혹은 천해 환경에서 퇴적된 사암-이암 교호층이 우세해지는 것으로 해석된다. 심도 약 735.7 m에서 해저면까지 두껍게 분포하는 이암이 우세한 지층은 해양성 부유 퇴적물로 해석되며 간헐적으로 협재하는 사암층은 저탁류의 발달을 지시한다. 해양성 부유 퇴적물은 포항분지 육상에 분포하는 연일층군에 대비될 것이다.

탄성파 층서 및 구조

영일만 해상의 탐사 조건이 불량하여 탄성파 탐사자료의 왕복주시 0.2초 이하에서는 다중반사파가 강하게 나타나고, 잡음이 많기 때문에 층서 및 단층 해석이 어렵다. 그럼에도 불구하고, 영일만 해상에서 취득한 탄성파 자료는 음향기반암이 예상보다 심부에 위치하고, 퇴적층을 지시하는 반사파 특징이 관찰된다. 앞 절에서 기술한 바와 같이 음향기반암 해석에 적합하도록 왕복주시 1.0초 주변의 잡음을 최대한 제거한 최종 탄성파 단면을 이용하여 탄성파 해석을 수행하였다 (Fig. 9).

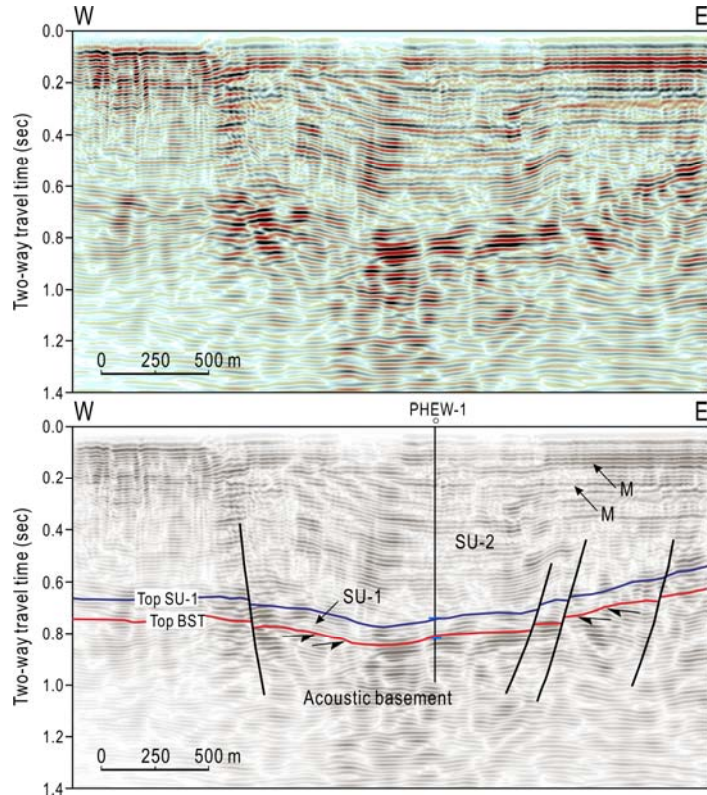


Fig. 9. A representative seismic section (14YC-002) and its interpretation. For the location of the section, see Figure 2. BST: basement, M: multiple reflection, SU: seismic unit.

음향기반암 상부 경계면(Top BST)은 왕복주시 0.8~1.0초 사이에서 나타나는 반사파 배열의 변화와 진폭의 변화로 인지하였다(Fig. 9). 특히, 음향기반암 상부 경계면을 따라 경사진 반사파들의 침멸과 배열 형태가 달라지는 것이 뚜렷이 관찰된다. 음향기반암 위에 올라오는 탄성파 단위층(Seismic Unit, SU)은 하부의 단위층-1(SU-1)과 상부의 단위층-2(SU-2)

로 구분하였다(Fig. 9). 단위층-1은 음향기반암 상부에 올라오며 배열이 다소 불량하고 진폭이 강한 반사파들이 부분적으로 관찰된다. 이들 반사파 조합은 횡적 변화가 심하고, 연속성이 대체로 불량한 것이 특징이다. 두 단위층의 경계면(Top SU-1)은 강한 진폭의 반사파 특성과 부분적으로 아래걸침하는 반사파 형태의 변화로 인지된다. 단위층-2는 전반적으로 진폭이 약하고 연속성이 양호한 반사파들로 구성되어 있다. 이들은 서로 평행하거나 준평행하게 배열되어 있다. 해저면과 왕복주시 0.2초 사이 구간은 잡음신호가 두드러져 탄성파 특성을 파악하기 어렵다.

탐사공 시추코어 암상 변화와 탄성파 반사파 특성을 고려하여 기반암과 탄성파 단위층들을 대비하였다(Figs. 8 and 9). 기반암 상부 경계면의 경우 일반적으로 퇴적층과의 경계면에서 강한 진폭 특성이 나타나지만 연구지역에서는 이러한 강한 진폭 특성이 뚜렷하지 않다. 이는 포항분지의 기반암이 신생대 화산암이고, 직상부에 올라오는 퇴적암도 화산쇄설성 입자를 다수 포함하고 있어, 밀도나 속도의 차이가 크지 않기 때문에 탄성파 단면에서 강한 진폭의 음향기반암 특성이 나타나지 않는 것으로 해석된다. 단위층-1은 하성환경 혹은 삼각주 환경에서 퇴적된 조립질 퇴적층으로 대비된다. 기반암으로 희미하게 윗걸침하는 반사파 특성과 횡적 변화를 보이는 진폭 특성은 국지적으로 분포하는 조립질 퇴적층의 분포 특성에 기인하는 것으로 해석된다. 단위층-2에서 관찰되는 연속성이 양호하고 평행하며 진폭이 비교적 약한 반사파 특성은 해양의 저에너지 환경에서 퇴적된 세립질 퇴적층으로 해석된다. 뚜렷한 암상의 변화를 보이는 단위층-1과 2의 경계면은 수심이 깊어지는 퇴적 환경의 변화를 지시하고, 각 단위층은 해수면 변동 혹은 분지 구조 운동과 연관되어 발달하는 순차층(sequence)으로 여겨진다.

연구지역의 탄성파 단면과 시간구조도에서 북북동-남남서 방향으로 발달하는 정단층들이 관찰된다(Figs. 9 and 10). 서쪽에 분포하는 정단층의 상반에서 음향기반암의 심도가 깊고, 단층 하반은 상대적으로 용기되어 있다(Fig. 10(a)). 서쪽 정단층의 상반에서 음향기반암은 정단층과 평행한 방향의 축을 가지는 향사 구조를 형성한다. 음향기반암은 대개 동쪽 방향으로 알아지고, 동쪽 지역에 상대적으로 규모가 작은 정단층들이 발달하고 있다. 단위층-1의 상부 경계면의 분포는 음향기반암 상부 경계면의 분포와 유사하다(Fig. 10(b)). 단위층-1은 서쪽 정단층 상반에서 향사 구조를 형성하고 하반에서 소규모의 배사 구조가 나타나는 것이 특징이다.

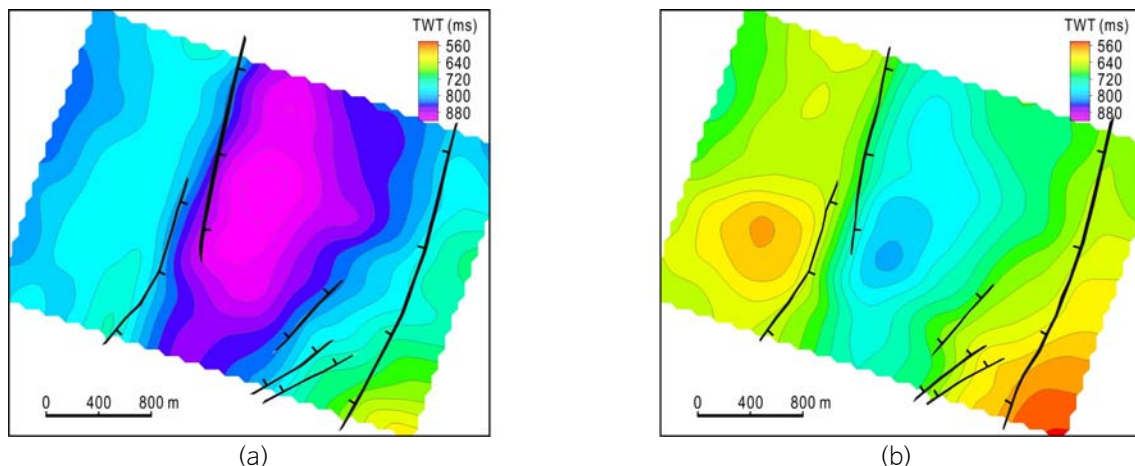


Fig. 10. Time structure map of top BST and top SU-1. For the location map, see Figure 2. TWT: two-way travel time, ms: millisecond.

탄성파 단면에서 해석한 주요 반사파를 심도로 변환하기 위해 심도에 따른 속도 변화를 유추해야한다. 시추공 VSP (Vertical Seismic Profiling), 음파속도 등의 측정 자료가 부재하여 심도별 속도를 유추하기 어렵다. 따라서, 탄성파 단면

에서 해석한 기반암과 단위층-1의 상부 경계면을 시추공에서 인지한 심도 855.5 m, 735.7 m와 각각 대비하여 왕복주시를 심도로 변환하였다. 시간구조도를 심도로 변환하면 음향기반암의 심도는 해수면 기준으로 약 650~950 m에 분포하고, 단위층-1 상부 경계면 심도는 약 550~830 m에 분포한다(Fig. 11). 단위층-1의 두께는 약 60~170 m이며 평균 두께는 약 123 m이다.

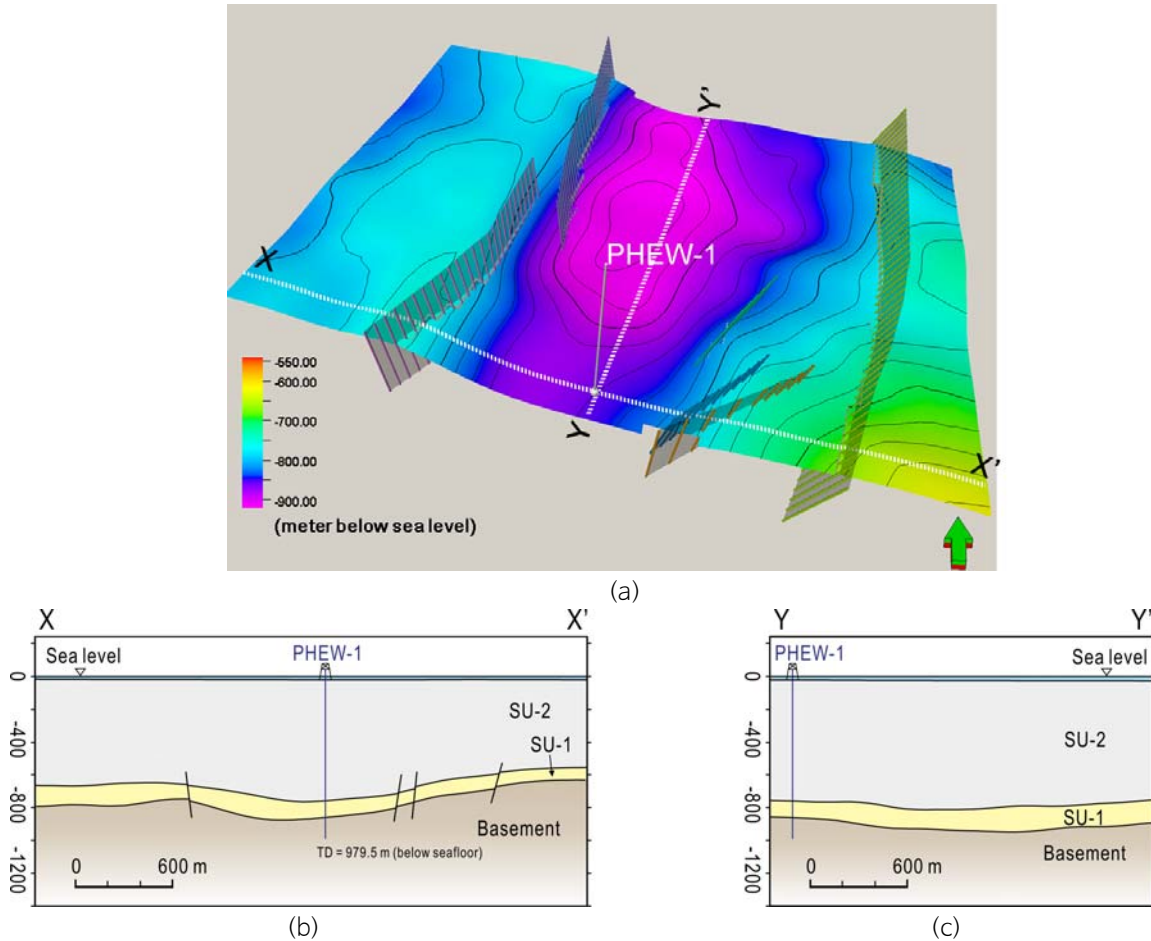


Fig. 11. (a) Depth structure map of Top BST. (b) and (c) Depth cross-sections across PHEW-1 borehole (no vertical exaggeration). TD: total depth below seafloor, SU: seismic unit.

소규모 이산화탄소 지중저장 적합성

연구지역에서 소규모의 이산화탄소 주입 부지 특성화를 위해 탐사 시추 및 탄성파 자료를 취득하였다. 이들 자료에 근거하여 소규모 이산화탄소 지중저장을 위한 부지로서의 적합성을 검토하였다. 일반적으로 이산화탄소 지중저장에 적합한 지층은 1) 초임계 이산화탄소 주입이 가능한 온도와 압력을 만족하는 심도 보다 깊은 곳에 위치해야 하고, 2) 주입 및 저장에 용이한 사암층을 포함해야 하며, 3) 광역적인 이암층에 의한 상부 밀폐가 가능하고, 4) 단층에 의한 교란이 미약한 지층이어야 한다.

현재까지 자료 분석 결과에 의하면, 연구지역에서 유망한 저장층은 단위층-1 내부에 수 미터 규모로 협재하는 사암과 역암 층들이다(Fig. 8). 이들 유망 저장층들은 해수면 기준 심도 550 m보다 깊은 지역에서 주로 관찰되며, 초임계상의 이

산화탄소 주입 및 저장이 가능한 심도에 분포한다(Fig. 11). 사암 플러그 시료를 이용한 공극률 및 투과도 측정 결과에 의하면, 15% 이상의 공극률을 가지는 시료의 경우 투과도가 대개 0.1~100 mD 사이의 다양한 값을 가지는 것으로 측정되었다(Choi et al., 2017). 따라서, 사암층의 주입성은 다소 불량할 것으로 예상된다. 덮개암은 단위층-1 내부에 협재하는 호성 혹은 천해 환경에서 퇴적된 이암층이 가능하고, 단위층-2를 주로 구성하는 이암층은 광역적인 덮개암을 형성할 것으로 기대된다. 광역적인 이암층은 포항분지 육상과 해상에 모두 분포하고 있으며, 두께도 수 백 미터에 이르기 때문에 덮개암으로서 양호할 것이다. 탐사공을 이용한 Leak-Off Test 결과에 의하면 이암층의 덮개 능력이 양호한 것으로 분석되었다(Chang et al., 2016).

연구지역에는 북북동 방향의 단층들이 발달하고 있다(Fig. 10). 이 단층들의 주향 방향과 주변 지역의 응력 방향을 고려하면, 현재 역학적으로 안정된 상태로 분석되었다(Chang et al., 2016). 단층들은 기반암과 퇴적층 하부에 주로 발달하고 있고, 지표면까지 연장되는지 여부는 불투명하다. 탄성파 단면에서 천부에 잡음신호가 많기 때문에 단층 연장 여부를 판단하는데 한계가 있다. 연구지역에서 취득한 Chirp, Sparker 탄성파 자료의 천부 지층 영상에서는 뚜렷한 단층의 발달이 인지되지 않았다. 하지만, 추가적인 조사 및 탐사를 통해 단층 분포를 정밀하게 파악할 필요가 있고, 이를 바탕으로 이산화탄소 주입에 따라 단층 활동에 어떤 영향을 받는지 정량적으로 분석하는 것이 필요하다(e.g., Lee et al., 2017).

결론

포항시 영일만 해역 포항분지에서 소규모 이산화탄소 주입이 가능한 지층의 유무와 지질구조 파악을 위해 탄성파 탐사 및 시추공 지질 자료를 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

1. 2D 탄성파 자료처리는 영일만의 낮은 수심에서 비롯되는 다중반사파의 제거와 짧은 스트리머 사용으로 인한 낮은 신호-대-잡음비 기록의 품질 향상에 주안점을 두고 수행되었고, 최적의 공정을 도출하였다.
2. 연구지역에서 포항분지의 기반암은 해수면 기준 심도 650~950 m에 분포하며 기반암을 덮고 있는 퇴적층은 두 개의 단위층으로 구분하였다. 하부의 단위층-1은 하성 또는 삼각주 환경에서 퇴적된 조립질 퇴적층, 상부의 단위층-2는 해양 부유성 퇴적물과 얇은 저탁류 사암으로 구성된 세립질 퇴적층으로 해석하였다.
3. 단위층-1은 주로 사암 및 역암으로 구성되어 있고 평균 두께는 약 123 m이다. 수 미터 정도 두께의 사암 및 역암 층들은 여러 매가 누적되어 나타나고, 대부분 초임계상의 이산화탄소 주입이 가능한 심도에 분포하고 있어 소규모 이산화탄소 저장층으로 활용 가능하다.
4. 단위층-2를 주로 구성하는 이암층은 포항분지 육상과 해상에 모두 분포하고 있고 두께도 수 백 미터에 이르기 때문에 덮개암으로서 매우 양호하다.
5. 연구지역에 발달하는 북북동 방향의 단층들은 퇴적동시성 정단층으로 수직적 연장성이 불량할 것으로 기대된다. 하지만 이들 단층이 천부지층과 해저면까지 연장되는지 여부를 확인하기 위해 추가 정밀 조사 및 탐사가 필요하다.

사사

포항 영일만 해상 탄성파 탐사에 도움을 주신 한국지질자원연구원의 탐해2호 선원 및 관련 참여연구원들에게 감사드립니다. 이 논문은 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업인 “포항분지 중규모 해상 CO₂ 지중저장 실증 프로젝트”와 “포항분지 해상 소규모 CO₂ 주입실증 프로젝트”과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Berner, R.A., 1980, *Early Diagenesis: A Theoretical Approach*, Princeton University Press, 241p.
- Byun, H., Yun, H., 1992, Miocene dinoflagellate cysts from the central part of the Pohang basin, Korea, *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 8(2), 164-235.
- Chang, C., Jo, Y., Quach, N., Shinn, Y.J., Song, I., Kwon, Y.K., 2016, Geomechanical Characterization for the CO₂ Injection Test Site, Offshore Pohang Basin, SE Korea, 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, Houston, ARMA-2016-541.
- Cheon, Y., Son, M., Song, C.W., Kim, J.S., Sohn, Y.K., 2012, Geometry and kinematics of the Ocheon Fault System along the boundary between the Miocene Pohang and Janggi basins, SE Korea, and its tectonic implications, *Geosciences Journal*, 16(3), 253-273.
- Choi, J., Lee, K., Shinn, Y.J., Yasuhara, H., Lee, D.S., 2017, Direction Hydraulic Properties Characteristics of Reservoir Rocks for CO₂ Geological Storage, 4th ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Jeju.
- Chough, S.K., Hwang, I.G., Choe, M.Y., 1990, The miocene doomsan fan-delta, South Korea: A composite fan-delta system in back-arc margin, *Journal of Sedimentary Petrology*, 67, 130-141.
- Han, J.H., Kwak, Y.H., Son, J.D., Son, B.K., 1987, Tectonic evolution and depositional environments of the Tertiary sedimentary basin, southeastern part of Korea, Report KR-86-2-(B)-4, Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, 109p (in Korean with English abstract).
- Han, R., Kim, C.-M., Song, C.W., Cho, H., Ghim, Y.-S., Son, M., Sohn, Y.K., 2012, Geological storage of CO₂ in the Pohang Basin: Preliminary discussion based on geological structures and hydraulic properties of sedimentary deposits, Fall joint annual conference of the geological societies in Korea (Abstracts), Jeongseon, October 24-27, 102 (in Korean).
- Holloway, S., 1997, An overview of the underground disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 38, 193-198.
- Hwang, I.G., 1993, Fan-delta systems in the Pohang basin (Miocene), SE Korea, PhD Thesis, Seoul National University, 973p.
- Hwang, I.G., Chough, S.K., Hong, S.W., Choe, M.Y., 1995, Controls and evolution of fan delta systems in the Miocene Pohang Basin, SE Korea, *Sedimentary Geology*, 98(1-4), 147-179.
- KIGAM, 2014, Characterization of storage strata and development of basis design technology for demonstration of CO₂ geological storage, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2012-030-2014(2), 441p (in Korean with English abstract).
- Kihm, J.H. Kim, J.M., 2013, Prediction and analysis of behavior of carbon dioxide injected into target geologic formations in the Bukpyeong Basin. Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(3), 389-406 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Song, I., Chang, C., Lee, H., Kim, T., 2013, Relations between physical and mechanical properties of core samples from the Bukpyeong and Pohang basins, *The Journal of Engineering Geology*, 23(4), 329-340 (in Korean with English abstract).
- Kongsjorden, H., Kårstad, O. and Torp, T.A., 1998. Saline aquifer storage of carbon dioxide in the Sleipner project. *Waste management*, 17(5-6), 303-308.
- Kwon, Y.K., 2017, Achievements and plans of small-scale CO₂ injection demonstration project, 2017 Joint Conference of the Geological Science and Technology of Korea (Abstracts), Gyeongju, April 19-21, 42 (in Korean).
- Lee, C.B., Kim, T.K., Park, D.W., 2009, Geology and geochemistry of volcanic and sedimentary rocks from deep borehole in the Heunghae area, North Kyungsang Province, *The Journal of Engineering Geology*, 19(4), 459-474 (in

Korean with English abstract).

- Lee, H., Shinn, Y.J., Ong, S.H., Woo, S.W., Park, K.G., Lee, T.J., Moon, S. W., 2017, Fault reactivation potential of an offshore CO₂ storage site, Pohang Basin, South Korea, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 152, 427-442.
- Metz, B., Davison, O., de Coninck, H., Loos, M., Mayer, L.A. (Eds.), 2005, *Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 431p.
- Noh, J.H., 1994, Stratigraphy, lithology and diagenetic mineral facies of the tertiary Yeonil Group, *Journal of the Petrological Society of Korea*, 2(2), 91-99 (in Korean with English abstract).
- Orr, J.F., Taber, J.J., 1984, Use of carbon dioxide in enhanced oil recovery, *Science*, 224(4649), 563-569.
- Sohn, Y.K. Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang Basin, SE Korea, *Sedimentology*, 51(6), 1387-1408.
- Sohn, Y.K., Rhee, C.W., Shon, H., 2001, Revised stratigraphy and reinterpretation of the Miocene Pohang basinfill, SE Korea: sequence development in response to tectonism and eustasy in a back-arc basin margin, *Sedimentary Geology*, 143(3-4), 265-285.
- Son, M., Song, C.W., Kim, M.C., Cheon, Y., Jung, S., Cho, H., Kim, H.-G., Kim, J.S., Sohn, Y.K., 2013, Miocene crustal deformation, basin development, and tectonic implication in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(1), 93-118 (in Korean with English abstract).
- 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), 53-66 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.H. Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan), *Geological Society of America Bulletin*, 107(1), 83-97.
- Yoon, S., 1975, Geology and paleontology of the Tertiary Pohang Basin, Pohang district, Korea, Part I, *Geology*, *Journal of Geological Society of Korea*, 11(4), 187-214.