

# 영일만 해상 CO<sub>2</sub> 주입 실증 사이트에서의 주입 전 모니터링 탐사 예비결과

박명호<sup>1</sup> · 이창식<sup>2</sup> · 김병엽<sup>2\*</sup> · 김지훈<sup>3</sup> · 김규중<sup>2</sup> · 신영재<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구시스템과학과, <sup>2</sup>(주)에이에이티, <sup>3</sup>한국지질자원연구원

## Preliminary Results of the Pre-injection Monitoring Survey at an Offshore CO<sub>2</sub> Injection Site in the Yeongil Bay

Myong-Ho Park<sup>1</sup> · Chang Shik Lee<sup>2</sup> · Byoung-Yeop Kim<sup>3</sup> · Ji-Hoon Kim<sup>3</sup> · Kyu Jung Kim<sup>2</sup> · Young Jae Shinn<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth System Sciences, Yonsei University

<sup>2</sup>AAT Co. Ltd.

<sup>3</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

### Abstract

In the demonstration-scale offshore CO<sub>2</sub> storage project, the monitoring team studies geophysical and geochemical monitoring of CO<sub>2</sub> injections in the Yeongil Bay, in which a CO<sub>2</sub> test injection (about 100t) was performed in January, 2017 and further injections in larger scales are planned for 2018 and 2019. In this study, the development status of the Korea-type Hydro-Geophone OBS (Ocean Bottom Sensor) and the geochemical baseline survey (focused on some anions of sediment pore water) are suggested as the preliminary results of the pre-injection test.

**Keywords:** Geophysical and geochemical monitoring, pre-injection test, Korean-type OBS, sediment pore water, Yeongil Bay

### 초 록

포항분지 해상 중규모 실증 모니터링 연구팀은 영일만의 해상 CO<sub>2</sub> 주입 실증 사이트에서 주입되는 CO<sub>2</sub> 를 모니터링하기 위하여 지구물리-지화학 복합 모니터링 연구를 수행하고 있다. 이 연구에서는 주입 전 모니터링 탐사의 1차 결과로서, 지구물리 탐사에서는 한국형 Hydro-Geophone OBS (Ocean Bottom Sensor) 탐사장비 개발 현황과 3D 탄성파 탐사의 결과를, 천부 지화학 탐사에서는 주입사이트의 주입 전 지화학 베이스라인 탐사(퇴적물 공극수의 음이온)에 대한 예비결과를 제시하였다.

**주요어:** 지구물리-지화학 모니터링, 주입 전 탐사, 한국형 OBS, 퇴적물 공극수, 영일만

### 서론

포항분지 중규모 해상 CO<sub>2</sub> 실증 프로젝트는 포항시 영일만에 위치하는 심부 저장층에 포집된 CO<sub>2</sub>를 주입·저장하는 저장 실증 연구로서, 프로젝트 참여기관들은 1만 톤 이상의 주입된 CO<sub>2</sub>를 탐지하고 거동을 분석하기 위하여 지구물리-지화학 복합 모니터링 분야의

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Young Jae Shinn  
E-mail: shinn21@kigam.re.kr

Received: 11 May, 2018

Revised: 4 June, 2018

Accepted: 8 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.

기술을 연구하고 있다(Kwon, 2017). CO<sub>2</sub>를 주입하기 이전 단계(pre-injection)부터 주입 후(post-injection)의 장기에 걸쳐 주기적으로 CO<sub>2</sub> 거동을 분석하고, 넓은 영역의 3차원 탐사를 반복적으로 수행하는 데 드는 비용 절감을 위한 효율적인 모니터링 설계가 필요함에 따라 국내 대륙붕과 연근해 환경에 최적화된 한국형 Hydro-Geophone OBS (Ocean Bottom Sensor) 탐사장비를 개발하고 있다. 또한 저장소와 실증 인근지역을 대상으로 하는 천부 지화학 모니터링 기술은 지구물리 탐사 기법에 겸하여 중장기 탐사의 횟수 제한이 따르지 않는 저비용/고효율의 해상 모니터링 방법으로서, CO<sub>2</sub> 누출이 발생했을 경우 퇴적물 내 공극수와 가스 분석을 통해 누출 여부와 특성 등을 정밀하게 감지하기 위한 기술이다.

상기한 해상-해저 복합 모니터링 연구를 위하여 2016년 9월에 한국지질자원연구원의 탐해2호와 OBS 설치 선박을 이용하여 주입 전 모니터링 탐사를 1차로 수행하였고, 그 후 주입 전 지구물리-지화학 자료를 분석하여 1차적인 결과를 얻는데 성공하였다. 따라서 이 연구에서는 지구물리 및 지화학 분야의 주입 전 예비결과를 제시하였고, 그 결과의 의미들을 토의하였다.

## 연구지역

동해가 확장되던 마이오세 동안 한반도 동해안을 따라서 발생한 지각변형의 대표적인 산물 중의 하나는 지각확장으로 인한 퇴적분지의 형성이다(Son et al., 2007). 한반도 남동부의 마이오세 퇴적분지들은 양산단층과 울산단층을 기준으로 동편에 분포하고 있으며, 포항분지의 확장 형식은 대부분의 선행 연구에서 양산단층의 우수향 주향이동에 의한 당겨열림(pull-apart)형 확장을 제안하고 있지만, 일부 연구에서는 포항분지 확장이 양산단층의 주향이동과는 무관하며, 또한 다른 구조선에 의해 주도된 것으로 보기도 한다(Sohn and Son, 2004; Son et al., 2007; Cheon et al., 2012).

포항시와 영일만 그리고 그 주변의 육지와 바다 일대의 지질은 쥐라기 화성암류(대보관입암류)와 백악기 퇴적암류(신동층군, 하양층군) 및 화성암류(유천층군, 불국사관입암류)를 기반암으로 하여 고신생기(Paleogene) 화성암류, 신신생기(Neogene) 퇴적암류(장기층군, 연일층군) 및 제4기 충적층으로 구성되어 있다(Sohn and Son, 2004). 특히, 이 논문의 연구지역인 영일만 해상지역의 지질을 하부로부터 백악기 기반암 및 고신생기 화산암류, 장기층군에 해당하는 화산암류, 그리고 연일층군에 해당하는 하성 역암 및 사암층, 천해성 사암층, 사암 및 이암 교호층, 해성 이암층 등으로 구분할 수 있다(KIGAM, 2014).

영일만에서 피스톤 코어로 취득한 최상부의 천부퇴적물(< 7 mbsf, meters below seafloor)은 주로 이질 퇴적물로 구성되어 있으며, 일부 사질 또는 보다 조립한 입자로 구성되어 있다. Chirp 단면에 의하면, 음향기반암 위에 층리 구조의 퇴적층, 채널을 채운 구조, 또는 단층선이나 음향기반암의 기복 등으로 해석될 수 있는 구조의 지층들이 발달되어 있다.

## 연구방법

### 지구물리 모니터링 탐사 방법

포항분지 영일만 해역 내 주입 부지에 대하여 40개의 Hydro-Geophone OBS 수신 시스템과 에어건 음원을 이용한 해저면 2D 및 3D 탄성파 탐사를 수행하였다.

3D OBS 에어건 탄성파 탐사는 2016년 3월 주입 지점으로부터 북동측으로 350 m 떨어진 400×350 m<sup>2</sup> 장방형 해역에서 수행되었다(Fig. 1). 하나의 로프에 8 개의 Hydro-Geophone OBS를 50 m 간격으로 고정하였으며, 이러한 OBS 배열 로프를 100 m 간격으로 5개를 배치함으로써 총 40 (8×5)개의 OBS를 해저면에 설치하였다. 각 OBS의 위치를 정확히 파

악하기 위하여 각 로프의 끝 부분에 위치 신호 송수신용 비이콘(Beacon)을 별도로 부착하였다. 가능한 한 많은 폴드의 공통 중간점 모음 자료(Common Mid-Point Gather)를 획득하기 위하여 OBS 설치 면적의 9 배에 달하는 1,200×1,050 m<sup>2</sup>의 장방형 해역에서 방파제와 평행한 방향으로 진행하면서 269 inch<sup>3</sup>의 에어건 발파가 25 m 간격으로 수행되었다(Fig. 2(a)).

주입 전 배경 탐사를 위한 2D OBS 에어건 탄성파 탐사는 2016년 9월 주입 지점으로부터 북동측으로 250 m 떨어져 방파제와 평행한 2 km 측선에 대하여 수행되었다(Fig. 1). 3D 탐사의 경우와 달리, 40 개의 OBS를 50 m 간격으로 한 측선에 배치하였으며, 각 OBS의 위치를 정확히 파악하기 위하여 10 개 OBS 위치마다 비이콘을 별도 부착하였다. 동일한 측선을 따라 269 inch<sup>3</sup>의 에어건 발파가 25 m 및 12.5 m 간격으로 2회 수행되었다(Fig. 2(b)).

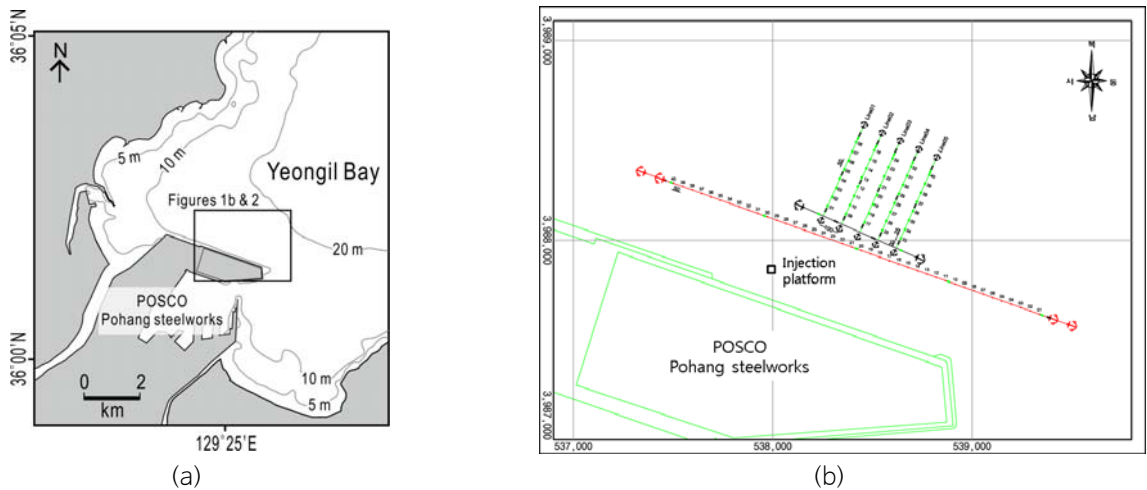


Fig. 1. (a) Location map of the study area. (b) Location of OBS (Ocean bottom sensor) nodes for 3D (green lines) and 2D (red line) seismic survey.

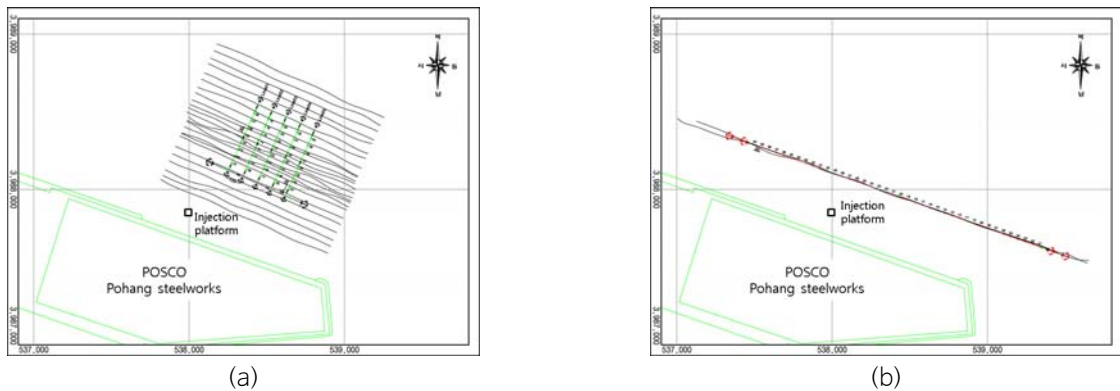


Fig. 2. Location of (a) 3D and (b) 2D seismic survey lines (black lines).

### 지화학 분석을 위한 천부 퇴적 시료

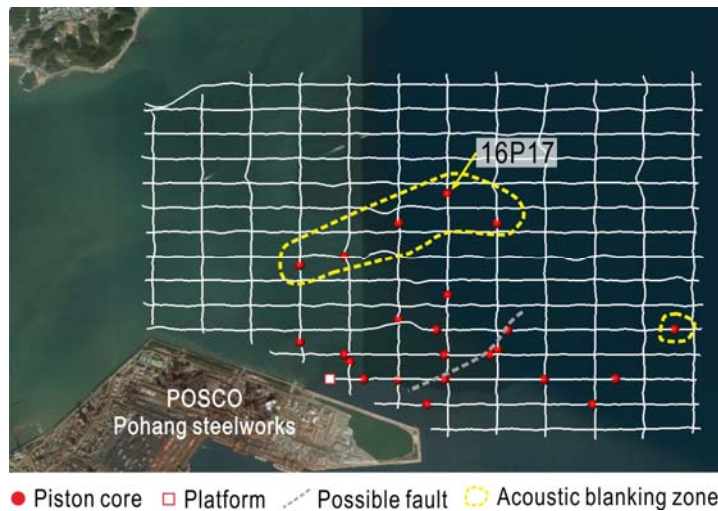
한국지질자원연구원과(주)에이에이티의 탄성파 및 Chirp 탐사 자료를 활용하여 지화학 모니터링을 위한 천부 시료의 취득지역을 조사하였다. 지화학 모니터링 분석을 위해 천부가스가 함유되어 있을 가능성이 높은 퇴적층 발달지역을 우선적으로 고려하였고, CO<sub>2</sub> 주입 이후의 누출 가능성이 상대적으로 높은 구조(예: 예상 단층대)를 포함하는 지역도 시료 채취 지역에 포함하였다. 이러한 기준에 따라, 지화학 모니터링을 위한 최적의 피스톤 코어링(piston coring) 위치를 우선 20개

선정한 후, 현장에서 시추 가능 여부, 천부 퇴적물의 상태 등에 따라 최종 취득 개수를 10개로 압축하였다(Table 1).

**Table 1.** Location of piston cores collected in the Yeongil Bay.

No.	Piston Core No.	Piston Site No.	Location		Water depth (cm)	Core length (cm)	No. Headspace gas samples	No. Pore water samples
			X	Y				
1	16YC2-P01	16P17	539173.4700	3989782.6100	21.2	600	12	11
2	16YC2-P02	16P01a	541487.3500	3988397.5200	22.0	620	14	12
3	16YC2-P03	16P01	538766.7300	3988430.3300	21.0	568	11	11
4	16YC2-P04	16P10	540655.0500	3987643.3900	21.0	20	x	x
5	16YC2-P05	16P06	539142.1300	3987889.7700	18.0	x	x	x
6	16YC2-P06	16P03	539147.0200	3988139.3600	20.0	292	3	8
7	16YC2-P07	16P14	538183.8900	3988068.2600	17.0	146	3	5
8	16YC2-P08	16P05	538349.0700	3987892.1200	17.0	181	4	x
9	16YC2-P09	16P16a	538677.7400	3988496.5300	20.0	400	9	x
10	16YC2-P10	16P18	539179.3500	3988745.2400	22.0	510	11	x

피스톤 코어는 수심 17~22 m의 천해에서 취득하였고, 코어 길이는 1.4~6.2 m이다. 취득 위치는 주로 해상 CO<sub>2</sub> 주입 플랫폼 인근 지역, 단층대로 추정되는 지역, 세립질 해저면으로 추정되는 지역 등이다. 또한 주입한 CO<sub>2</sub>의 이동경로로 추정되는 방향은 지질구조상 동쪽 내지 동남쪽이기에, 이에 해당하는 지역도 포함시켰다. 취득한 10 개의 코어 중에서 5 개의 코어에서 총 47 개의 공극수 시료를 채취하였다(이 연구에서는 첫 번째로 실험결과가 나온 코어 16P17에 대해서 분석함; Fig. 3). 공극수 추출 시 토양용액채취기(Rhizon sampler)를 이용하였고, 실험실 분석을 위하여 저온 창고에서 약 4°C로, 최대 4시간 보관하였고, 시료당 14 ml 이상의 시료를 채취하였다.



**Fig. 3.** Location of piston cores, in which the core 16P17 was analyzed in this study. White thick lines represent Chirp seismic profiles.

## 공극수 시료의 전처리와 분석방법

추출한 공극수는 염도, 알칼리도(alkalinity), 주요 음이온 농도(Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) 등을 분석하기 위하여 각각의 개별 분석 항목에 따른 용기에 공극수 시료 분배 작업, 전처리 실시 및 시료 보관 작업을 수행하였다(Fig. 4).



Fig. 4. Pore fluid sampling and pre-treatment for geochemical analyses.

공극수 분석은 ODP Technical Note 15의 방법(Gieskes et al., 1991)을 이용하였다. 염도는 Fisher사의 염도측정 굴절계(Refractometer)로, 염소 이온(Cl<sup>-</sup>) 농도는 0.02 N 질산은(AgNO<sub>3</sub>)을 이용한 모르 적정법(Mohr titration)으로 분석하였다. 알칼리도는 페놀프탈레인(Phenolphthalein) 지시약 및 브로모크레졸(Bromocresol)과 메틸 레드(Methyl Red) 혼합 지시약의 pH에 따른 색 변화를 이용하여 0.02 N 염산(HCl)에 의한 적정법으로 측정하였다. 음이온은 선상에서 3차 증류수를 이용하여 11배로 희석하여 냉장보관한 후 한국기초과학지원연구원(KBSI)의 이온 크로마토그래피(Ion Chromatography) DX-1500으로 분석하였다.

## 결과 및 토의

### 개발된 Hydro-Geophone OBS 사양 및 특성

개발된 Hydro-Geophone OBS는 최대 수심 400 m에서 사용되도록 설계되었다. 하우징의 외형은 원통형이며, 아세탈 재질의 본체와 아크릴 재질의 덮개로 구성되었다(Fig. 5). 내부는 지오폰(geophone)과 하이드로폰(hydrophone) 센서, 획득된 신호를 기록하는 로거부 및 전원부로 구성되어 있다. 이를 포함한 일반적인 사양을 Table 2에 정리하였다. 지오폰 센서의 주파수 대역은 10~240 Hz, 하이드로폰 센서의 주파수 대역은 0~40,000 Hz로서 대부분의 탄성파 탐사 음원 신호 대역을 포함한다. 또한 신호 진폭 차이가 큰 다양한 종류의 음원들을 감안하여 24비트 A/D 변환기를 적용하였으며, 결과적으로 최대 120 dB 진폭 차이의 신호까지도 기록할 수 있도록 하였다.

초절전형 기판이 설계되었으며, 필요한 전자 부품에 대한 잡음 특성 분석 후 신호 대 잡음비가 높은 전자 부품들을 선별하였다. 로거 기판은 아날로그 기판과 디지털 기판으로 구성되었다. 아날로그 기판에서 센서 전원이 공급되며, 센서의 측정값이 아날로그 기판으로 입력된다. 입력된 측정값은 증폭되고 A/D 변환기를 통과하여 디지털값으로 변환되며, 디지털 기판으로 전달되어 메모리카드에 저장된다.

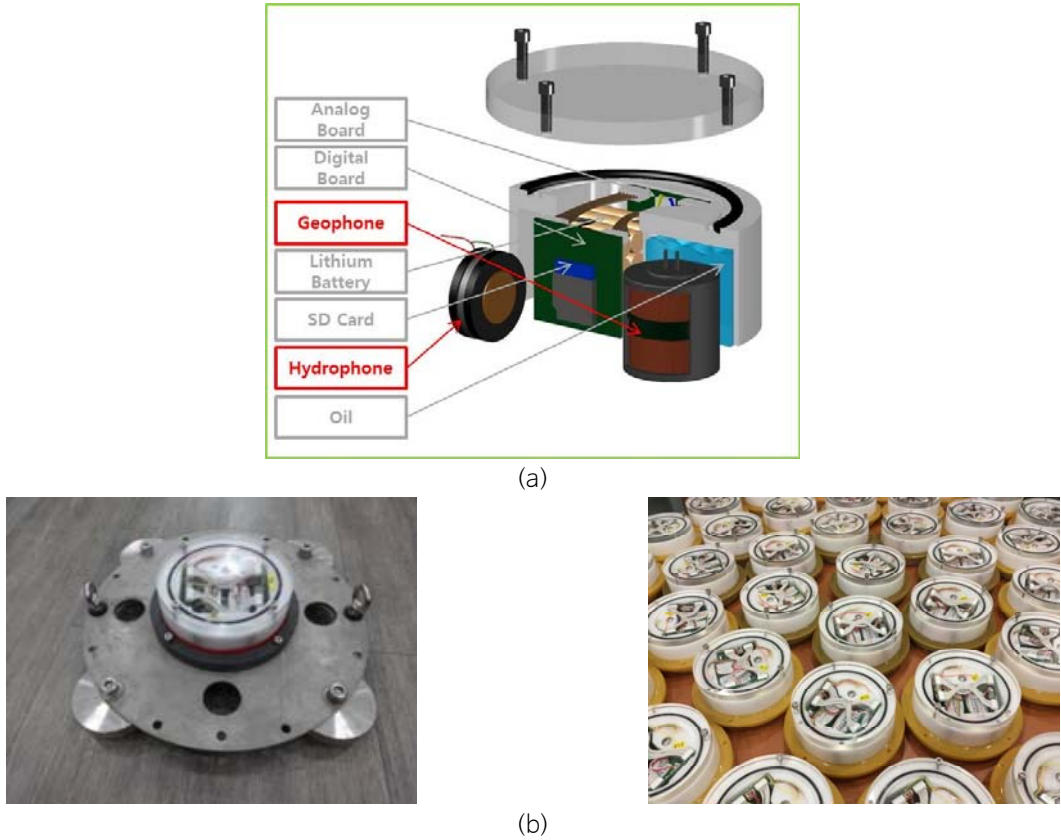


Fig. 5. (a) 3-dimensional drawings and (b) photographs of hydro-geophone OBS.

Table 2. Composition and specifications of hydro-geophone OBS.

Composition	
Hydrophone	S5003 (Disc type)
Geophone	Vertical SM-24 (10Hz)
AD converter	24 bit ADS1251
CPU	32 bit PIC32MX795
Battery	NiMH 7.2V 3,000 mAH NiMH 3.6V 7,500 mAH
Specifications	
Hydrophone filter	10 Hz High pass, 200 Hz Low pass
Maximum operating depth	400 m
Sampling rate	1,024 Hz
Data storage capacity	2~64 GByte
Current consumption	40 mA
Duration	140 hr
Synchronizing method	Wireless (Radio frequency)

천해역에서 스트리머 탄성파 탐사 혹은 OBS 탄성파 탐사를 수행할 경우 수층 내부에서 연속 반사되는 다중반사파가 지층 구조 파악을 방해하는 잡음으로 작용한다. 이와 같은 다중반사파 문제를 해결하기 위하여 OBS 내부에 압력 센서인 하이드로폰과 속도 센서인 지오폰을 각각 배치하였다(Fig. 5). 매질에서 반사되어 올라오는 상향 파동의 경우 지오폰 및

하이드로폰에서 극성이 동일하지만, 해수면에서 반사되어 내려가는 하향 파동의 경우 두 센서가 반대 극성을 보이게 된다 (Wang et al., 2009). 따라서 하향 파동에 대하여 하이드로폰과 지오폰의 신호를 정규화(normalizing)시킨 후 두 신호를 합하여 해수면 기반 고스트(ghost) 또는 다중반사파를 제거할 수 있다.

그러나 두 센서가 모든 주파수 영역에서 동일한 위상 차이를 보이는 것은 아니기 때문에, 이들이 동일한 위상을 갖도록 신호를 변환하여야 한다. 또한 고유 주파수 이하 영역의 경우 두 센서 모두 신호의 감쇠를 보였으며, 그 기울기는 하이드로폰이 6 dB/Octave, 지오폰이 12 dB/Octave로서 서로 상이하였고, 따라서 두 신호의 감쇠율이 동일하도록 신호를 변환하여야 한다. 하이드로폰 신호에 2차 고주파 통과 필터를 적용함으로써 이 두 문제점을 해결하였다.

개발된 OBS 수신기는 하이드로폰 및 지오폰 센서를 모두 포함하고 있기 때문에, 이들의 시차를 동기화(Synchronizing)하는 과정이 필수적이다. 기존의 동기화 방법과는 달리 마이크로프로세서에서 출력되는 시각 신호를 모든 A/D 변환기에 전달하는 방법을 고안하여 적용함으로써 초소형, 저잡음, 저전력의 OBS를 구현하였다.

### OBS 탄성파 자료처리 예비결과

영일만에서 주입하는 이산화탄소의 거동을 파악하기 위한 모니터링 탐사를 수행하기 전 반복성 충족 및 베이스라인(baseline) 탐사의 가능성을 확인하기 위하여 40대의 OBS 노드를 이용하여 3차원 해저면 탐사를 수행하고 이 자료에 대해 전산처리를 수행하였다.

본 탐사해역은 수심이 15~17 m 정도로 매우 낮고 인근의 방파제 주변을 향해하는 선박들로 인해 다중반사파와 국소 잡음이 매우 심하며 낮은 수심으로 인한 표면파 기인 잡음(scholte wave)과 수면층을 반복적으로 반사한 가이드 웨이브(guide wave) 등이 전반적으로 포함되어 있다. 취득한 원시 자료(raw data)를 음원 모음(shot gather)으로 보면 심한 가이드 웨이브와 굴절파가 큰 에너지를 가지며 지배적으로 분포하는 것만 확인할 수 있지만 이를 수신기 모음(OBS gather, receiver gather)으로 보게 되면(Fig. 6) 굴절파, 가이드 웨이브뿐만 아니라 낮은 수심으로 인한 표면파에 기인한 기인 잡음과 역전파(back propagation) 현상과 이산화탄소 주입대상 지층 심도에서 강한 임피던스를 가진 반사파가 존재함을 확인할 수 있다.

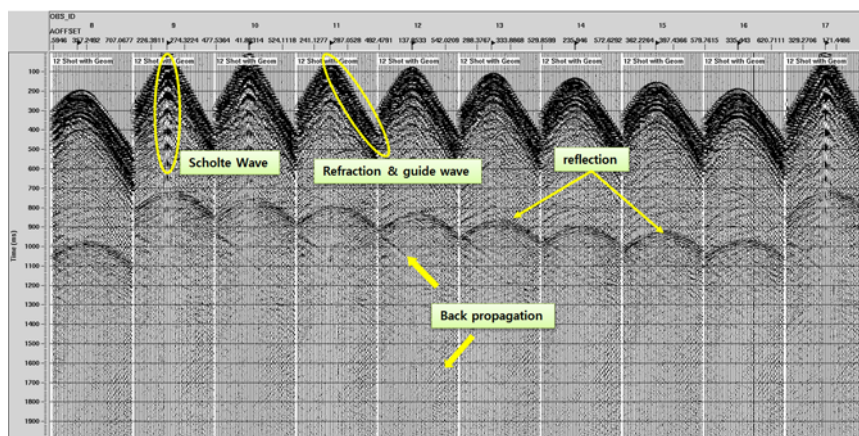


Fig. 6. Raw data in receiver (OBS) gathers.

원시자료에 대해 자료처리를 통하여 최종적으로 3차원 중합 볼륨을 작성하였다(Fig. 7). 3차원 자료처리는 비닝(binining) 과정을 제외한다면 2차원 자료처리와 거의 동일하다. 비닝의 설계에 있어서 OBS 탐사는 육상 3D 탐사와 유사

하기 때문에 육상 3D 지형정보 제작틀을 사용하였다. 자료처리 목적은 최소 규모의 3차원 배열을 구성하여 자료처리 공정을 수립하는데 있으며, 이는 향후 대용량 주입층 모니터링 탐사에 활용될 수 있도록 하는 것이다. 지형정보 구축 후의 전처리, SRME (Surface Related Multiple Rejection)를 이용한 다중반사파 제거, 속도분석 및 중합후 처리 과정을 거치면서 자료의 품질이 향상되는 것을 확인하였다. 다만, 발파 수에 비해 적은 수의 노드가 사용되었기 때문에 전반적인 중합도가 낮고, 특히 모델 상부의 해상도가 매우 낮다. 향후 대규모 수진기를 이용하여 넓은 방위각의 long-offset 자료를 취득한다면 좀 더 해상도가 높고 정밀한 속성분석이 가능해질 것이다.

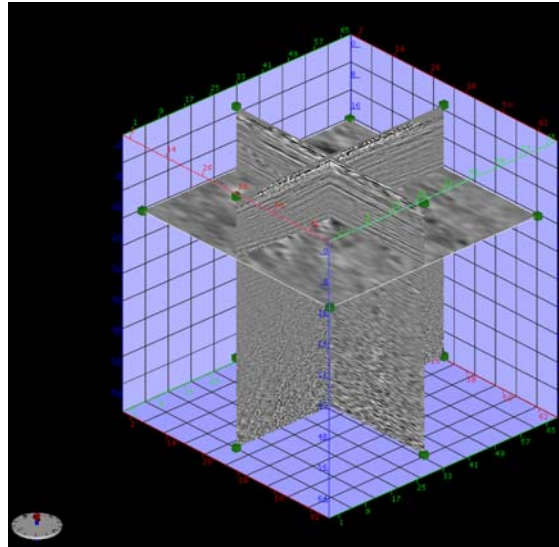


Fig. 7. Final stacked volume of 3D OBS seismic survey data.

### 지화학 분석 예비결과

추출한 공극수로부터 굴절계로 염도를 측정하여 교정한 결과, 대부분의 시료는 33~34 ‰의 값을 보여주고 있다(Table 3). 염소 이온(Cl<sup>-</sup>) 농도는 534.9~578 mM의 값으로 측정되었고, 알칼리도는 4.0~69.7 mM의 값을 보여주었다. 해수의 알

Table 3. Pre-treatment result of pore fluid samples.

Sample No.	Section No.	Section Interval (cm)	Sample Volume	Salinity (PSU)	Anion (ml)	Cation (ml)	DOC (ml)	DIC (ml)	Corrected Salinity (PSU)
Y1	A1	10	19	35	5	5	5	2	34.02
Y2	A2	10	18	35	5	5	5	2	34.02
Y3	A3	10	15	35	5	4	4	2	34.02
Y4	A4	10	15	35	5	4	4	2	34.02
Y5	A5	10	16	35	5	5	4	2	34.02
Y6	A6	10	16	35	5	5	4	2	34.02
Y7	A7	10	16	34	5	5	4	2	33.05
Y8	A8	10	16	34	5	5	4	2	33.05
Y9	A10	10	16	34	5	5	4	2	33.05
Y10	A11	10	18	34	5	5	5	2	33.05
Y11	A12	10	15	35	5	4	4	2	34.02



칼리도가 2 mM임을 고려할 때, 코어에서의 알칼리도는 매우 높았다(Fig. 8).

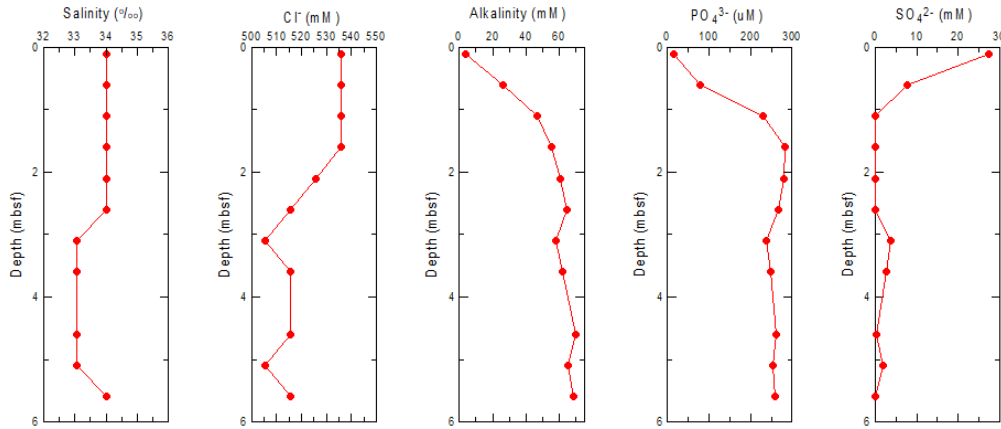


Fig. 8. Downcore profiles of salinity, Cl<sup>-</sup>, alkalinity, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in pore water of shallow sediments from the Yeongil Bay.

황산염 이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 농도는 0~27.3 mM의 범위로 측정되었다. 전체적으로 심도가 증가할수록 황산염 이온 농도가 감소하는 모습을 보였다. 반면, 인산염 이온(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) 농도는 14.6~284.0 µM의 범위로 측정되어, 황산염 이온 농도와는 반대로 심도가 증가함에 따라 확연히 농도가 증가하는 결과를 보여주고 있다.

### 천부 퇴적층의 황산염-메탄 전이구간

염도와 염소 이온 농도는 심도에 관계없이 일정한 값을 보이거나, 심도에 따라 증가하는 염도를 보이기도 한다. 이는 영일만이라는 연안 해양환경 하의 천부 퇴적층 내에서 담수의 영향을 부분적으로 받은 것으로 보인다. 측정된 염도는 동해 울릉분지에서 기준에 보고된 공극수의 농도와 유사하지만, 염소 이온 농도는 동해 울릉분지에 비해 높은 값을 보였다(Kim et al., 2011, 2013). 해수의 알칼리도가 보통 2 mM임을 고려할 때, 분석한 코어의 알칼리도는 매우 높은 값을 보여주고 있는데(4~69.7 mM), 심도에 따른 농도 변화는 황산염 이온 농도의 심도변화와 반대 현상을 보이고 있다. 특히, 황산염-메탄 전이구간(Sulfate-Methane Transition Zone, SMTZ)에서 알칼리도의 농도 구배의 변화가 관찰되는데, 일반적으로 황산염 환원작용에 의해 유기물이 분해될 때 1몰의 황산염이 소모되고 2몰의 중탄산염이 부산물로 생성되며(2CH<sub>2</sub>O + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> → 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + H<sub>2</sub>S), 메탄산화작용에 의해 유기물이 분해되는 황산염-메탄 전이 계면(Sulfate-Methane Interface, SMI)에서는 황산염이 1몰이 소모되고 1몰의 중탄산염이 부산물로 생성된다(CH<sub>4</sub> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> → HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + HS<sup>-</sup> + H<sub>2</sub>O) (Borowski et al., 1999; Kastner et al., 2008). 따라서 분석 코어의 결과를 보면, SMI 부근에서 메탄산화작용이 일어날 때 관찰되는 전형적인 알칼리도의 농도 기울기 변화가 관찰되기 때문에 연구코어의 SMI 심도에서도 메탄산화작용이 일어난 것으로 보인다.

황산염 이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 농도는 심도가 증가할수록 황산염 이온 농도가 감소하는데, 이같이 심도에 따른 황산염 이온 농도는 황산염 환원작용(sulfate reduction)의 결과로 보인다. 관찰된 SMI의 상부에서는 황산염 환원작용이, SMI 심도에서는 메탄 산화작용(Anaerobic methane oxidation, AMO)이, SMI 심부(하부)에서는 메탄이 생성되는 메탄 생성작용(methanogenesis)이 일어나는 것으로 알려졌는데(Borowski et al., 1996), 영일만의 코어에서는 SMI가 상당히 천부인 것으로 봐서 하부에 메탄가스가 상대적으로 풍부한 것으로 보인다. 분석 코어에서는 황산염이 황산염 환원구간(Sulfate Reduction Zone, SRZ) 내에서 거의 소비되고, 또한 가스 분석 결과를 대비하면 SMTZ이 0.8~1.2 mbsf에 위치한다(Fig.

9). 이와 같은 SMTZ는 AOM의 강도와 직접적으로 관련이 되며(Borowski et al., 1996), SMTZ의 가장 높은 피크는 AOM rate를 의미한다(Fig. 10).

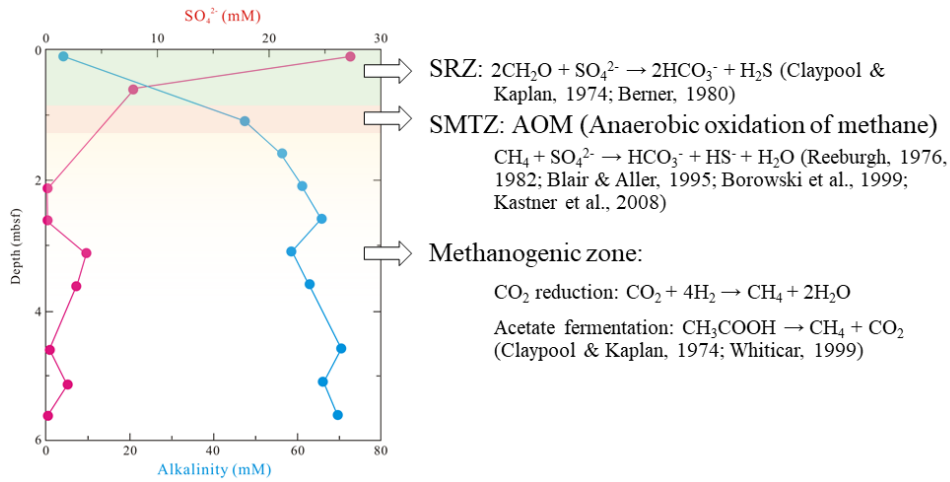


Fig. 9. Downcore profiles of  $SO_4^{2-}$  (mM) and alkalinity (mM), showing the presumed biogeochemical zonations. SRZ: sulfate reduction zone, SMTZ: sulfate-methane transition zone.

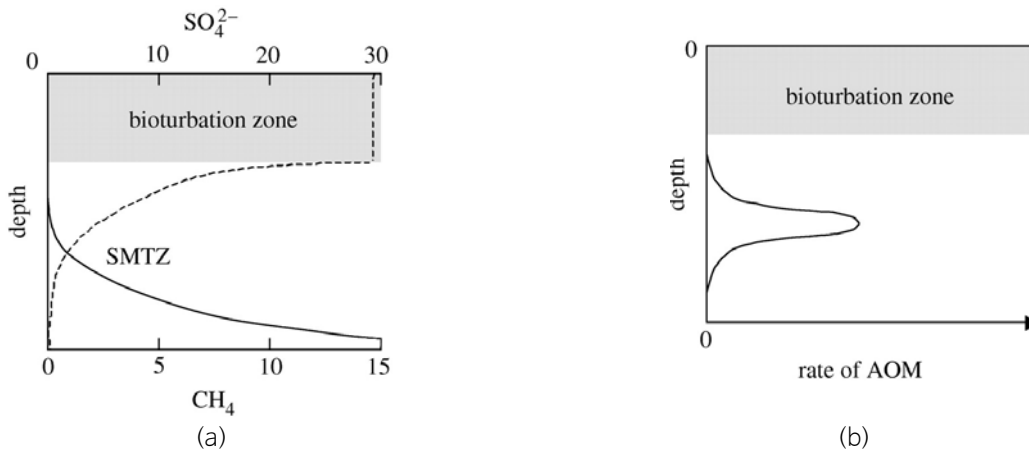


Fig. 10. (a) A schematic showing typical profiles of methane and sulphate in modern marine sediments. Solid line, methane concentration in pore waters; dashed line, sulphate concentration in pore waters. (b) A schematic showing the profile of AOM rate that corresponds to (a) (Catling et al., 2007).

황산염 구배는 매우 가파르고, 추정되는 SMTZ의 깊이는 올링분지에서 제시된 것보다 얇다. 이런 결과는 천부의 연안 퇴적물에서는 전형적으로 보여주는 값들이고(Borowski et al., 1999), 이처럼 매우 얇은 SMTZ(<1.2 mbsf)은 강한 메탄 공급을 가리키며(Kim et al., 2011), 추후 메탄 플럭스의 증가를 이해하기 위해서 탄소/황 순환과 비교할 필요가 있다. 또한 분석 코어에서는 심도가 증가할수록 인산염 이온( $PO_4^{3-}$ ) 농도가 확연히 증가하는데, 이는 환원작용에 의해 유기물이 분해되어 유기물에 포함된 인( $PO_4^{3-}$ )이 용존하기 때문인 것으로 보인다.

## 결론

1. 국내 연안 및 대륙붕 지역에서 CO<sub>2</sub> 지중저장 및 거동을 모니터링하기 위해 4성분 OBS를 국내 기술로 독자적으로 개발하였다. 지속적인 성능 개선과 현장 실증을 통해 향후 대규모 CO<sub>2</sub> 지중저장소 탄성파 모니터링에 성공적으로 적용하고 비용 절감과 안전성 확보에 기여할 것이다.
2. 영일만 실증 부지에 주입하는 CO<sub>2</sub>의 거동을 파악하기 위한 모니터링 탐사를 수행하기 전 반복성 충족 및 베이스라인 탐사의 가능성을 확인하기 위하여 40대의 OBS 노드를 이용하여 3차원 OBS 탄성파 탐사를 수행하였다. 비록 적은 수의 센서를 사용하였지만, 최소 규모(8×5)의 3차원 배열을 구성하여 영일만 주입층의 3차원 탐사 가능성을 확인하고 자료처리를 통하여 주입층 모니터링의 가능성을 확인하였다.
3. CO<sub>2</sub> 주입 전에 주입실증지의 천부퇴적물에 대한 공극수 지화학 분석을 수행하여 1차로 지화학 베이스라인 탐사를 완료하였으며, 분석한 종류는 염도, 염소 이온(Cl<sup>-</sup>), 황산염 이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 인산염 이온(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) 등이다.
4. 주입 전 지화학 탐사결과에 의하면, 주입실증지의 천부퇴적물 내에서는 생지화학적 반응들이 활발하게 일어나고 있다. 특히, 황산염이 황산염 환원구간(SRZ) 내에서 거의 소비되고 알칼리도와 암모늄이 심도와 함께 증가하고 있다.
5. 또한 1.2 mbsf 내의 아주 얇은 심도에 황산염-메탄 전이구간(SMTZ)이 존재함에 따라, 포항 영일만의 실증지역은 강한 메탄 공급(high upward methane flux)이 이루어지는 퇴적층으로 이루어져 있음을 알 수 있었다.

## 사사

지구물리-지화학 탐사 시 도움을 주신 한국지질자원연구원의 탐해2호 선원 및 관련 참여연구원들에게 감사를 드립니다. 이 논문은 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업인 “포항분지 중규모 해상 CO<sub>2</sub> 지중저장 실증 프로젝트” 과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Berner, R.A., 1980, *Early Diagenesis: A Theoretical Approach*, Princeton University Press, 241p.
- Blair, N.E., Aller, R.C., 1995, Anaerobic methane oxidation on the Amazon shelf, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(18), 3707-3715.
- Borowski, W.S., Pauli, C.K., Ussler III, W., 1996, Marine pore water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate, *Geology*, 24(7), 655-658.
- Borowski, W.S., Paull, C.K., Ussler III, W., 1999, Global and local variations of interstitial sulfate gradients in deep-water, continental margin sediments: Sensitivity to underlying methane and gas hydrates, *Marine Geology*, 159(1-4), 131-154.
- Catling, D.C., Claire, M.W., Zahnle, K.J., 2007, Anaerobic methanotrophy and the rise of atmospheric oxygen, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 365(1856), 1867-1888.
- 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.
- Claypool, G.E., Kaplan, I.R., 1974, The origin and distribution of methane in marine sediments, In: Kaplan I. R. (Ed.), *Natural Gases in Marine Sediments*, Plenum Press, New York, 99-139.

- Gieskes, J.M., Gamo, T., Brumsack, H., 1991, Chemical methods for interstitial water analysis aboard *JOIDES Resolution*, Ocean Drilling Program Technical Note 15, College Station, Texas, Ocean Drilling Program, 60p.
- Kastner, M., Claypool, G., Robertson, G., 2008, Geochemical constraints on the origin of the pore fluids and gas hydrate distribution at Atwater Valley and Keathley Canyon, northern Gulf of Mexico, *Marine and Petroleum Geology*, 25(9), 860-872.
- KIGAM, 2014, Characterization of storage strata and development of basis design technology for demonstration of CO<sub>2</sub> geological storage, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2012-030-2014(2), 441p (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., Park, M.H., Chun, J.H., Lee, J.Y., 2011, Molecular and isotopic signatures in sediments and gas hydrate of the central/southwestern Ulleung Basin: high alkalinity escape fuelled by biogenically sourced methane, *Geo-Marine Letters*, 31(1), 37-49.
- Kim, J.H., Torres, M.E., Lee, J.Y., Hong, W.-L., Holland, M., Park, M.H., Choi, J., Kim, G.-Y., 2013, Depressurization experiment of pressure cores from the central Ulleung Basin, East Sea: Insights into gas chemistry, *Organic Geochemistry*, 62, 86-95.
- Kwon, Y.K., 2017, Demonstration-scale Offshore CO<sub>2</sub> Storage Project in Pohang Basin, Korea, Kongju National University, Project Plan Report, 316p (in Korean).
- Reeburgh, W.S., 1976, Methane consumption in Cariaco Trench waters and sediments, *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3), 337-344.
- Reeburgh, W.S., 1982, A major sink and flux control for methane in marine sediments: anaerobic consumption, In: Fanning, K.A., Manheim, F.T. (Eds.), *The Dynamic Environment of the Ocean Floor*, D. C. Heath, Lexington, Massachusetts, 203-217.
- 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.
- Son, M., Kim, J.-S., Chong, H.-Y., Lee, Y.H., Kim, I.-S., 2007, Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their implications, *Korean Journal of Petroleum Geology*, 13, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Wang Y., Grion, S., Bale, R., 2009, What comes up must have gone down: the principle and application of up-down deconvolution for multiple attenuation of ocean bottom data, *CSEG Recorder*, 34(10), 10-16.
- Whiticar, M.J., 1999, Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane, *Chemical Geology*, 161(1-3), 291-314.