

# 포항분지 해상 CO<sub>2</sub> 주입정 시추 완결 및 구축

원경식<sup>1\*</sup> · 이대성<sup>2</sup> · 김상준<sup>1</sup> · 최성도<sup>1</sup>

<sup>1</sup>지오텍컨설파트(주), <sup>2</sup>동아대학교 에너지 자원공학과

## Drilling and Completion of CO<sub>2</sub> Injection Well in the Offshore Pohang Basin, Yeongil Bay

Kyoung-Sik Won<sup>1\*</sup> · Dae-Sung Lee<sup>2</sup> · Sang-Jun Kim<sup>1</sup> · Seong-Do Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geotech Consultant Co., LTD

<sup>2</sup>Dept. of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University

### Abstract

In this study, as part of the “Small-scale CO<sub>2</sub> Injection-Demonstration Project in Offshore Pohang Basin”, we performed drilling and completion of a CO<sub>2</sub> injection well from the offshore platform installed in the Yeongil Bay, Pohang city, Gyeongsang buk-do. The drilling of injection well was carried out from an offshore platform installing on the sediment formations of the Pohang Basin. Drilling diameters were reduced by stages, depending on the formation pressure and groundwater pressure along a depth and the casing installation and cement grouting in drilled hole were performed at each stage. The injection well was drilled to a final depth of 816.5 m with a hole diameter of 4 7/8 inches ( $\Phi$ 124 mm) and the perforated casing for an injection section was installed in a depth of 746.5~816.5 m. Injection tubing, packer, and christmas tree were installed for the completion of an injection well for CO<sub>2</sub>. The validation project of the CO<sub>2</sub> injection was accomplished successfully by drilling the injection well and installing the injection facilities, and through the suitable CO<sub>2</sub> injection process. The current injection facility is a facility for small-scale injection demonstration of 100 tons. In the case of large-scale demonstration facility test of a capacity of 10,000 tons, research is underway through the upgrading of the injection facilities.

**Keywords:** geological storage, injection well, injection-demonstration, CO<sub>2</sub>, offshore platform

### 초 록

본 연구는 “포항분지 해상 소규모 CO<sub>2</sub> 주입실증 프로젝트”의 일환으로 경상북도 포항시 영일만에 설치된 해상플랫폼에서 CO<sub>2</sub> 주입 실증을 위한 주입정 시추 및 완결(well drilling and completion)을 수행하였다. 주입정 시추(well drilling)는 포항분지 해상지역 퇴적지층에 설치한 해상플랫폼의 상부부터 해저면까지 케이싱 설치를 시작으로 단계별로 굴진 공경을 축소하면서 케이싱 설치 및 시멘트 그라우팅(cement grouting)을 시행하며 진행하였다. 최종심도 816.5 m 까지 공경 4 7/8 inch ( $\Phi$ 124 mm) 규격으로 굴진하여 심도 746.5~816.5 m 구간에 유공 케이싱을 설치하여 주입구간을 형성하였다. CO<sub>2</sub> 주입을 위한 주입공 완결(well completion)을 위하여 주입관, 패커(packer), 주입탑(christmas tree)을 설치하였다. 주입공을 완결하고 주입 플랫폼 설비를 설치하여 CO<sub>2</sub> 시험 주입을 성공적으로 수행하였다. 현재의 주입설비는 100톤 규모의 소규모 주입 실증을 위한 설비로서 향후 주입설비 격상을 통하여 총 1만톤의 중규모 실증 주입설비로 추가적인 연구개발을 진행하고 있다.

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Kyoung-Sik Won  
E-mail: geoconks@gmail.com

Received: 11 May, 2018

Revised: 13 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.

**주요어:** 지중 저장, 주입정, 주입 실증, 이산화탄소, 해상 플랫폼

## 서론

이산화탄소는 세계적인 기후변화를 초래하는 지구온난화의 주요원인으로 지목되는 온실가스 중에서 가장 많은 양을 차지하는 기체이다. 온실가스 저감을 위하여 파리기후협약(2015. 12)에서 세계 각국이 감축목표량을 제출하고 이산화탄소 저감에 다양한 노력을 하고 있다(United Nations, 2015). 이산화탄소 감소를 위한 방법 중에서 이산화탄소 지중저장은 기후 변화에 대응하기 위한 현실적인 대용량 이산화탄소 감축방법으로 알려져 있다(Holloway, 1997; Kim et al., 2013; Metz et al., 2005).

국내의 이산화탄소 지중저장에 대한 연구는 경상북도 포항시 일원의 퇴적분지에서 시행되고 있다. 이산화탄소의 지중저장을 위하여 육상저장은 장기분지, 해저저장은 포항분지에 대하여 물리탐사 및 탐사시추를 시행하여 저장층을 확인하고 CO<sub>2</sub> 주입실증을 위한 연구를 진행하고 있다. 포항분지는 경상북도 포항시 인근과 영일만 해역에 걸쳐 분포하는 신생대 마이오세에 형성된 퇴적분지로 양호한 공극률과 투수율을 가지는 역암, 역질 사암, 사암층으로 구성된다. 또한 상부에 두호층으로 알려진 600 m 이상의 두껍고 치밀한 세립질 퇴적암으로 피복되어 있어 덮개구조가 잘 발달하고 있다(Park et al., 2014; Sohn et al., 2001; Sohn and Son, 2004; Yoon, 2013).

CO<sub>2</sub> 지중저장 실증 연구사업의 후보지로 선정된 포항분지에 대한 최종 실증부지 선정을 위한 물리탐사와 시추조사가 2013년부터 2015년까지 수행되었다. 물리탐사의 천부 탄성파 탐사자료 분석결과 수심이 일정하고 천부 퇴적층의 암질이 균질한 특성을 나타내는 포스코 포항 공장 제방 앞바다가 유력한 실증 부지로 제시되었다. 탐사시추는 HQ(공경 96.0 mm)~NQ(공경 75.8 mm) 시추공경을 사용하여 심도 979.5 m 굴진하여 퇴적층과 기반암층의 코어를 회수하였다. 시추코어 분석결과 763.0~787.1 m, 800.0~827.2 m 구간에서 CO<sub>2</sub> 지중저장 실증이 가능한 다공질의 역질사암 및 사암층이 확인되었다(Yoon, 2015).

본 연구에서는 최종 실증부지로 선정된 포항시 포스코 앞바다에서 중소규모 해저 CO<sub>2</sub> 저장실증을 위하여 주입정을 설치하였다. 연구과제는 향후 CO<sub>2</sub> 지중저장 대용량 실증 및 CCS 상용화 사업에 필요한 기술 확보를 목적으로 수행하였다. 본 연구의 목적은 포항시 영일만 외해역에 위치한 포항분지 해저지역 심부 퇴적층 저장소에 실증요소기술을 검증하기 위한 주입정 설치를 통하여 시추 및 주입정 완결 기술을 개발하는 것이다. 본 논문은 주입정 설치 및 완결을 위하여 수행한 모든 활동사항과 과정을 제시하여 향후 대용량 CO<sub>2</sub> 지중저장 주입정 확보에 기여하고자 한다.

## 주입정 설치의 기본사항

이산화탄소 주입정은 해상에서 장심도를 굴진하여 CO<sub>2</sub> 해저 저장층 주입구간을 확보하고, CO<sub>2</sub> 주입 시 주입정 상부구간으로 누출되거나 역류되지 않도록 주입정 완결을 필요로 한다.

### 주입정 굴진(Injection well drilling)

시추 작업의 순서는 큰 직경의 공을 먼저 천공하고 큰 직경의 전도케이싱(conductor casing)을 설치한 후 점차적으로 작은 직경으로 천공해야 한다. 천공이 진행됨에 따라 작은 직경의 강한 케이싱이 연속적으로 장착된다.

각 케이싱의 심도는 계획 단계에서 평가와 설계가 이루어지고, 주입정 설치과정에서 재평가 및 수정 된다. 각 케이싱의

길이, 시추이수 밀도, 시추장비, 시멘트 유형 및 양, 기타 많은 과정은 예상되는 실제적인 주입정 압력에 기초하여 결정된다.

주입정 굴진경 및 케이싱 규격 등은 실증부지 시추탐사 결과로 확인되는 지층별 암반상태를 감안하여 굴진과 완결 계획을 수립하였다. 주입정 설치를 위한 굴진경 및 케이싱 규격은 API(American Petroleum Institute) 기준과 국내 조달 가능한 자재를 기준으로 설정하였다. Fig. 1은 주입정 시공을 위한 굴진경 및 케이싱의 단계별 굴진계획이다(API, 2016; Rahman and Chilingarian, 1995).

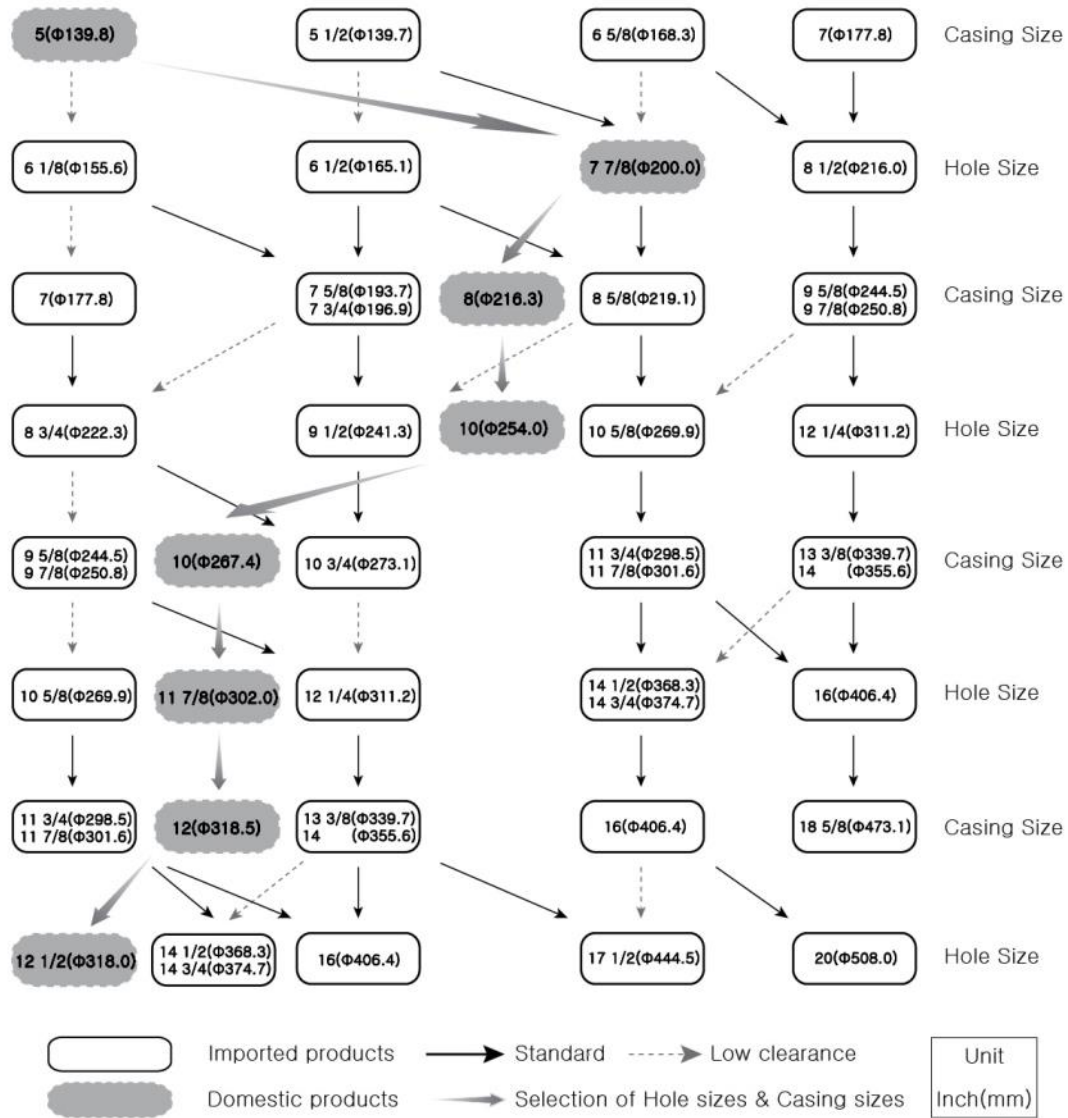


Fig. 1. Hole diameters of an injection well and sizes of corresponding casing.

### 시추수 순환시스템

시추압편 제거를 위한 시추수의 순환을 위하여 전도케이싱을 설치하고 해저에 고정시킨다. 시추수의 순환은 이수탱크 (mud tank)로부터 시작하며, 높은 압력으로 시추스트링(drill string) 내부로 주입하여 시추 파쇄물(drilling cut)을 지표로 이동 후 시추수와 분리하여 분석하였다.

## 지층 분석

시추공에서 인지되는 지층 중에 CO<sub>2</sub> 저장 가능한 층을 선정하기 위해서 여러 가지 분석방법을 사용하고 있으며, 본 작업에서는 가장 기본적인 방법으로 시추 파쇄물을 분석하였고, 보다 정교한 기법으로는 지구물리 방법을 이용한 공내검층(well logging) 방법을 수행하였다. 또한 CO<sub>2</sub> 주입을 위한 지층물성 파악은 대상 CO<sub>2</sub> 저장층의 공극률과 심도에 따른 지층의 온도와 압력이 계측되었다.

## 주입정 완결(Injection well completion)

주입정의 굴진이 끝난 후 주입정은 CO<sub>2</sub>를 주입할 수 있는 주입관(tubing)과 여러 가지 장비들로 완결되어야 한다. 주입정 완결작업의 목적은 다음과 같다(Jonathan, 2010; Wan, 2011).

- 지표로부터 CO<sub>2</sub> 저장층까지 주입통로를 확보
- CO<sub>2</sub> 저장층을 상부 지층과 주입구간 외의 구역으로부터 격리
- 저장층의 자연상태를 보전

하부구간 완결작업(lower completion)은 저장층 주입구간에 필요한 유공 케이싱(perforated casing) 또는 슬롯 라이너(slotted liner), 여과사리(gravel pack)을 설치하는 과정으로 저장층의 지질 및 수리적인 특성과 매우 밀접한 관계가 있다. 상부 완결작업(upper completion)은 주입관 끝에서부터 상부에 이르는 CO<sub>2</sub>를 주입하기 위한 모든 장비(패커, 주입관 등)를 말한다. 주입탐은 주입과정의 온도, 압력 등을 관리하는 장비로 구성되는 지표위에 세워지는 시설이다.

주입정 완결시설 설계는 저류층의 온도 및 압력에 따른 CO<sub>2</sub>의 상변화를 분석하고 CO<sub>2</sub> 상태별 점성도 및 밀도 변화에 대한 관찰을 통해 시추공 내부 압력 변화를 고려한 최적의 완결 방법을 선정하였다. CO<sub>2</sub> 주입시 발생할 수 있는 주입정 부식을 방지하기 위하여 내산성이 뛰어난 STS 316L 재질의 주입관으로 설계하였다. 주입관 하부에 CO<sub>2</sub> 주입시 상부구간으로 누출되지 않도록 패커를 설치하고 주입정 상부에 CO<sub>2</sub> 주입을 위한 주입탐을 설치하였다. 패커는 CO<sub>2</sub> 가스에 손상되지 않는 우레탄(urethane) 재질의 팽창형 패커(inflatable packer)를 사용하였다.

## 주입정 시추

### 주입정 위치

주입정 시추위치(위도 36° 02' 05.7"N, 경도 129° 25' 18.1"E)는 경상북도 포항시 남구 송정동 379번지 전면해상으로 포스코 방파제와 170 m 이격된 해상에 위치한다(Fig. 2).

주입정 위치가 해상에 위치하는 관계로 해상플랫폼을 구축하고, 시추장비 및 현장작업 인원은 해상바지(barge) 및 선박을 이용하여 운송하였다.

### 해상 플랫폼

해상 주입정 굴진과 주입설비 설치에 필요한 공간 확보를 위하여 해상 플랫폼을 설치하였다. 해상 플랫폼은 주입정 시추위치가 수심 15~17 m 정도의 중심도 지역이며, 너울성 파도가 우세하여 구조물의 높은 안정성이 요구됨을 감안하여 폰톤형(pontoon type)에 비하여 구조 안정성이 양호한 재킷형(jacket type)으로 선정하였다. 재킷형은 하부 재킷 기초구조

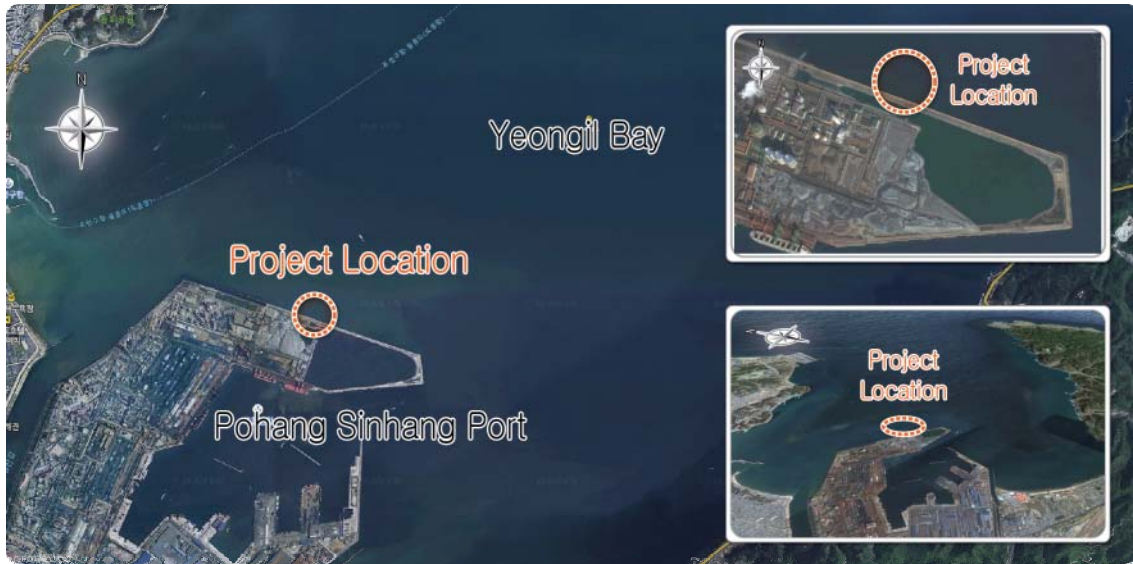


Fig. 2. Location of the injection well.

Table 1. Specification of the offshore platform

Component	Material	Weight (ton)
Jacket	API 2W Gr.50	152
	API 5L Gr.B	
Pile	API 2W Gr.50	132
Deck	SM490B, SS400	139
Total		423

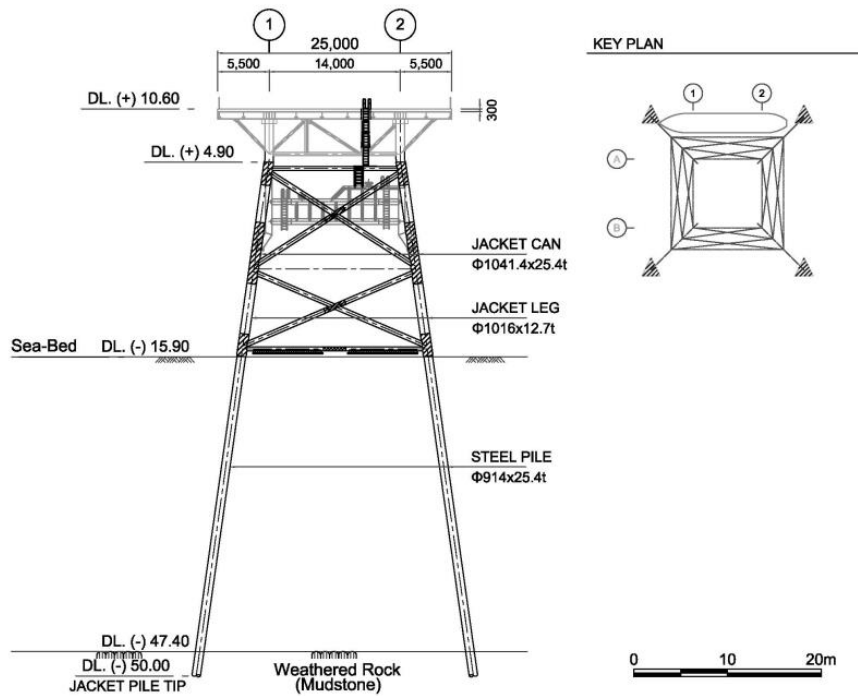


Fig. 3. Basic design for the offshore platform.



물과 상부 데크 프레임(deck frame)으로 구성되었다.

해상플랫폼의 평면배치는 조류 및 주풍향 영향의 최소화와 대상 바지선, 선박이 원활하게 항행, 접안을 하도록 계획하였다. 데크(deck)의 규격은 시설 배치 현황 및 작업공간, 인허가 문제 등을 고려하여 25 m × 25 m로 적용하였다.

플랫폼 설계 기준은 평균수심 15 m, 100년 빈도 설계파고(10.62 m), 설계 풍속 23 m/s(순간최대 38 m/s), 내진설계 규모 6.0, 10톤 미만 소형선 접안시설, 설계하중 200톤 등의 설계조건과 실제 예상 운영기간을 고려하여 플랫폼 접합부 피로 검토 10년 기준 및 지진 재현주기 500년 기준 내진설계를 적용하였다(Table 1, Fig. 3).

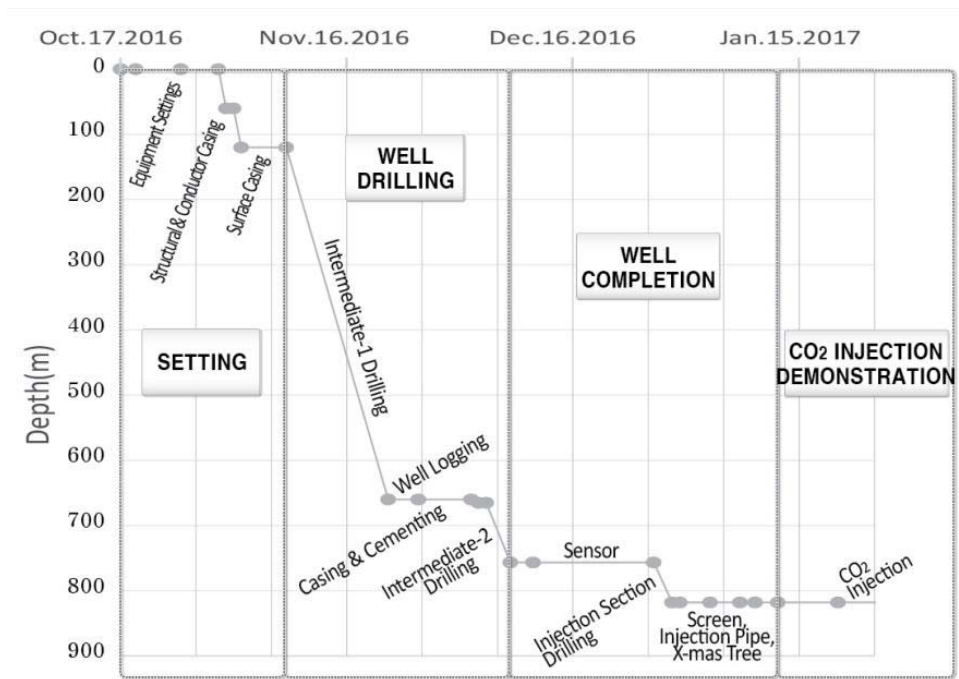
플랫폼은 육상에서 재킷과 데크 구조물로 분리하여 제작하고 해상에 설치하였다. 플랫폼의 설치는 하부구조물인 재킷을 설치한 후, 재킷 고정을 위한 강관파일(steel pile)을 항타하여 지지심도까지 근접하고, 상부 구조물인 데크를 결합하였다.

### 주입정 시추 일정

주입정 시추 및 주입설비 설치를 위하여 해상플랫폼을 2016년 8월 20일~10월 15일 동안 설치한 후 시추기 및 시추장비를 해상바지를 이용하여 이동 설치하여 굴진작업을 진행하였다. 해상플랫폼 설치가 완료된 후 2016년 10월 17일 장비 이동을 시작하여 2017년 1월 20일 해상주입시설 설치를 완료하였다(Table 2, Fig. 4).

**Table 2.** Milestone of injection well drilling

Component	Period	Remak
Setting	2016. 10. 17. ~ 2016. 11. 08.	Equipment mobilization (land and maritime transportation)
Well drilling	2016. 11. 09. ~ 2016. 12. 07.	Intermediate drilling
Well completion	2016. 12. 08. ~ 2017. 01. 12.	Injection section
Injection demonstration	2017. 01. 13. ~ 2017. 01. 20.	Injection facilities Install



**Fig. 4.** Drilling schedule of the Injection well.

### 주입정 굴진 및 케이싱 설치

주입정은 하부로 갈수록 공경을 축소하는(Φ318 mm→Φ302 mm→Φ254 mm→Φ200 mm→Φ124 mm)단계별 굴진 방식을 사용하여 공벽 불안정 요인을 최소화 하였다. 최종 공경은 주입구간 상부구간까지 5 inch(Φ139.8 mm) 케이싱을 설치하고, 주입구간은 스크린을 설치하였다(Fig. 5).

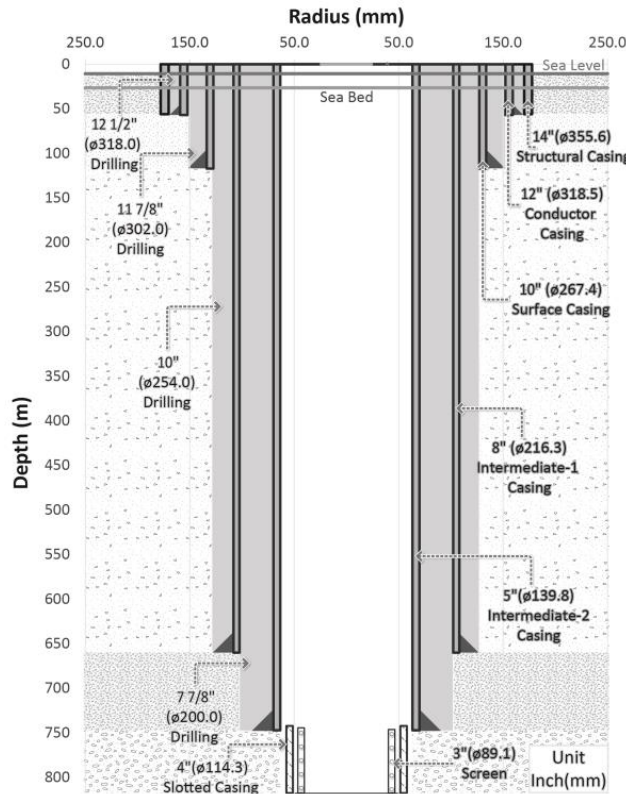


Fig. 5. Status of well drilling and casing installation.

주입정 굴착은 지층특성 및 현장상황을 반영하여 아래와 같이 시공하였다(Table 3, 4).

- ① 시추작업의 효율성 향상 및 시추 안정성 확보를 위해 주입정 최외곽에 풍화암 심도까지 구조 케이싱(structural casing; Φ355.6 mm) 및 전도 케이싱(conductor casing; Φ318.5 mm)을 설치하고 공벽과 밀착을 위하여 시멘트 그라우팅을 실시하였다.
- ② 풍화암 하부에서 시추공 외부로 이수가 흘러 들어가거나 시추공으로 지하수 유입을 방지하기 위하여 11 7/8 inch (Φ302 mm) 충격식 착정(percussion drilling)과 117 m 심도까지 10 inch(Φ267.4 mm) 케이싱을 설치하였다.
- ③ 하부심도까지 굴진을 위하여 1차 660 m 심도까지 10 inch(Φ254 mm) 충격식 착정 및 8 inch(Φ216.3 mm) 케이싱을 설치하고, 2차 746.5 m 심도까지 7 7/8 inch(Φ200 mm) 트리콘 비트 굴진(tricon bit drilling) 및 5 inch(Φ139.8 mm) 케이싱을 설치하였다. CO<sub>2</sub> 주입시 부식에 대한 영향을 방지하기 위하여 공저 하부에서 100 m 구간은 STS 316L 재질의 케이싱을 사용하였다.
- ④ CO<sub>2</sub> 주입을 위한 주입(injection) 구간은 4 7/8 inch(Φ124 mm) 트리콘 비트 굴진하고, 746.5~816.5 m 구간은 유공케이싱(Φ114.3 mm)과 웨지 와이어 스크린(wedge wire screen; Φ89.1 mm)을 설치하였다.

**Table 3.** Installation status of casings by depth

Component	Drilling section (m)	Drill size		Casing size	
		inch	mm	inch	mm
Structural	-	-	-	14	355.6
Conductor	0~58.5 (58.5)	12 1/2	318.0	12	318.5
Surface	58.5~120 (61.5)	11 7/8	302.0	10	267.4
Intermediate-1	120~660 (540)	10	254.0	8	216.3
Intermediate-2	660~756.5 (96.5)	7 7/8	200.0	5	139.8
Injection section	756.5~816.5 (60.0)	4 7/8	124.0	3	89.1

**Table 4.** Specification of the casings

Casing (inch)	Casing size (mm) OD/ID/T	Material
Structural (14)	355.6/340.4/7.6	Carbon Steel Pipes for Structural purposes
Conductor (12)	318.5/304.5/7.0	
Surface (10)	267.4/254.6/6.4	Carbon Steel Pipes for Ordinary piping
Intermediate-1 (8)	216.3/204.6/5.85	
Intermediate-2 (5)	139.8/126.6/6.6	Carbon Steel Pipes for Pressure Service STS 316L

### 시멘트 그라우팅

시멘트 그라우팅은 시추공과 케이싱 사이의 공간을 시멘트로 채워 공벽 안정화를 확보하는 시공방법이다. API는 지중 온도와 압력조건, 적용가능 심도 등에 따라 시멘트를 Class A~J로 분류하며, 그 중 가장 기본적이며 범용적으로 사용할 수 있는 Class G 시멘트가 석유 생산정 등에서 널리 이용되고 있다.

시멘트 종류에 따른 CO<sub>2</sub>에 대한 부식성 시험결과로 G class 시멘트는 6개월이 경과하여도 부식이 발생하지 않는 것이 캘거리 대학(Calgary University)의 시험에서 확인되었으며(Barlet-Gouedard et. al., 2008), 본 사업에도 G class 시멘트를 사용하였다.

단계별 케이싱 설치 후 주입정의 장기 안정성 확보를 위해 시멘트 그라우팅을 수행하였다. 시멘트 그라우팅은 주입구간을 제외한 전도케이싱, 지표케이싱(surface casing) 설치구간은 포틀랜드 시멘트(portland cement)를 사용하여 그라우팅을 실시하였다. 중개케이싱(intermediate casing) 설치구간 중 CO<sub>2</sub> 주입구간 상부에는 내산성이 우수한 G Class 시멘트를 사용하고, 염수에 의한 부식성 증가 및 강도 저하를 방지하고자 담수를 사용하였다(Table 5).

**Table 5.** Depths and volumes of cement grouting

Section	Volume (m <sup>3</sup> )	Material
Conductor	Platform~58.5 m	Portland cement
Surface	Platform~120.0 m	Portland cement
Intermediate-1	Platform~660.0 m	Portland cement
Intermediate-2	Platform~440.0 m	Portland cement
	440.0~746.5 m	G-Class cement



그라우팅의 현장시공은 설계된 투입량의 그라우팅재를 케이싱 내부에 투입하고, 각 케이싱 규격에 따른 플러그(plug)를 설치하여 주입하는 방식(latch down plug method)을 사용하였다. 그라우팅 완료 후 5~7일 이상의 충분한 양생기간이 후에 다음 단계 굴진을 진행하였다(Fig. 6).

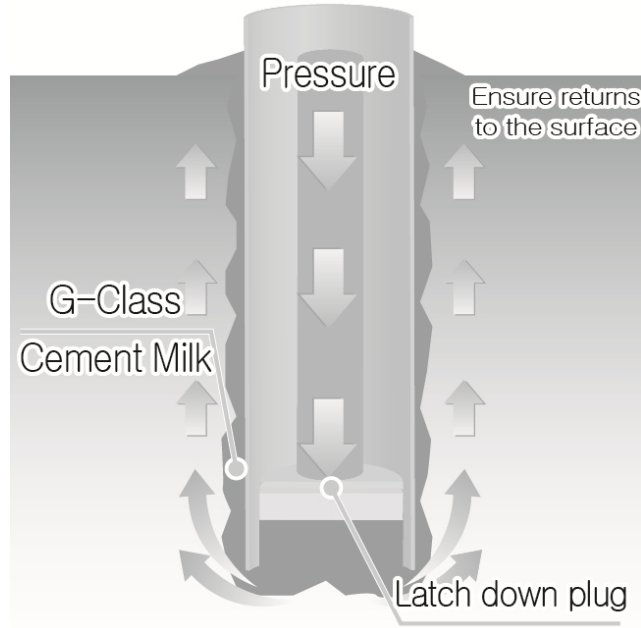


Fig. 6. Schematic diagram of cement grouting.

## 주입정 완결(Well completion)

### 주입구간 완결(lower completion)

주입정 하부 완결구간은 주입관 하부의 주입구간에 해당하는 부분을 말하며, 저류층의 조건에 따라 여러 가지 장비와 많은 선택사항이 있다.

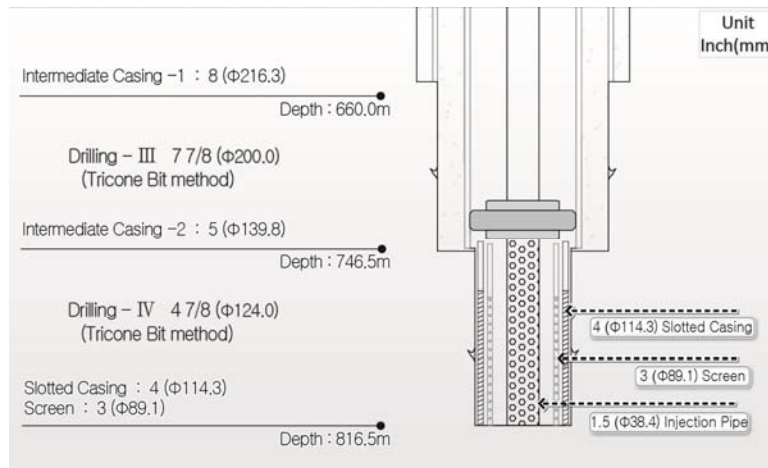


Fig. 7. Details of injection section (lower completion).

CO<sub>2</sub> 지중저장 실증을 위한 주입구간은 플랫폼 하부 GL.-746~-816 m 구간으로 역질사암, 역암, 이암층들이 분포되는 퇴적층이며, 굴진 후 공벽의 붕괴가 관찰되었다. 공벽방지 방지와 주입관 설치에 필요한 공경 확보를 위하여 4 inch(Φ 114.3 mm) 슬롯 케이싱을 설치하고, 내부에는 3 inch(Φ89.1 mm) 웨지 와이어 스크린을 설치하였다. 3 inch 웨지 와이어 스크린은 STS 316L 재질, 슬롯 폭 1.0mm 규격으로 주입정에 유입되는 세립 퇴적물질에 의한 주입구간 폐쇄를 방지하였다(Fig. 7).

### 주입관 및 패커 설치

상부 완결구간은 지표의 주입탑부터 안전밸브(safety valve), 주입관의 하부 패커까지를 포함한다. 주입관의 적절한 설계는 선정된 저장층의 지질특성 및 환경조건에 맞추어 효율적인 주입과 안전성을 강화 시킨다.

주입구간에 유공 스크린을 설치하고 CO<sub>2</sub> 주입을 위하여 5 inch(Φ139.8 mm) 주입정 케이싱 내부에 주입관으로 1.5 inch(Φ38.4 mm) 스테인리스 무계목강관(stainless seamless pipe)를 설치하였다. 주입관 하부에 CO<sub>2</sub> 주입 시 상부구간으로 누출되지 않도록 GL.-735 m 지점에 패커를 설치하였다(Table 6).

**Table 6.** Installation process of injection string

Stage	Description
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Scaffold production and installation</li> <li>- For Pipe Support installation</li> <li>- For Plug Embed Plate installation</li> <li>- For Pipe(vertical) Support installation</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pipe Support and Plug Embed Plate installation</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Beam installation for Pipe(vertical) stanchion</li> <li>- Measurement of verticality of the Beam</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Tower installation for Pipe(vertical) work</li> <li>- Winch installation for Scaffold and Kibble movement</li> <li>- Connect with Scaffold</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Screen(perforated) Pipe installation</li> <li>- Pipe(vertical, perforated) 13EA × 6 m installation</li> </ul>
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Packer(3.1 m) installation</li> <li>- Rubber Packing installation</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pipe(non-perforated) installation</li> <li>- Pipe(vertical) 122EA × 6 m installation</li> </ul>
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pipe(vertical) 1EA installation (Final Spool)</li> <li>- Blind flange installation</li> <li>- Pipe(vertical) connect to Injection well</li> </ul>

주입관은 패커 하부구간은 1.5 inch(Φ38.4 mm) 유공관을 설치하고, 패커 상부구간은 1.5 inch(Φ38.4 mm) 무공관을 설치하였다. 무공관 설치 시 커플링(coupling)을 6 m 간격으로 설치하여 센트럴라이저(centralizer) 및 리프팅러그(lifting lug) 기능을 수행하도록 하였다. 주입관과 커플링 연결은 용접방식으로 시공하였으며, 용접 불량을 방지하기 위하여 배관 공사 전문 용접사가 작업을 진행하고 비파괴검사를 시행하여 이를 확인하였다. 비파괴검사는 검사전문기관에 의뢰하여 전문기술 인력이 플랫폼 현지에서 직접 수행하였으며, 비자성(nonmagnetic) 금속재료에 주로 사용되는 액체침투탐상검사(liquid penetration test : PT)를 시행하였다(Fig. 8).



Fig. 8. Views of liquid penetration tester (PT).

패커 사양은 CO<sub>2</sub> 가스에 손상되지 않고 최대 주입압 40 MPa 까지 사용 가능한 우레탄 재질의 팽창형 패커를 설치하였다(Fig. 9).

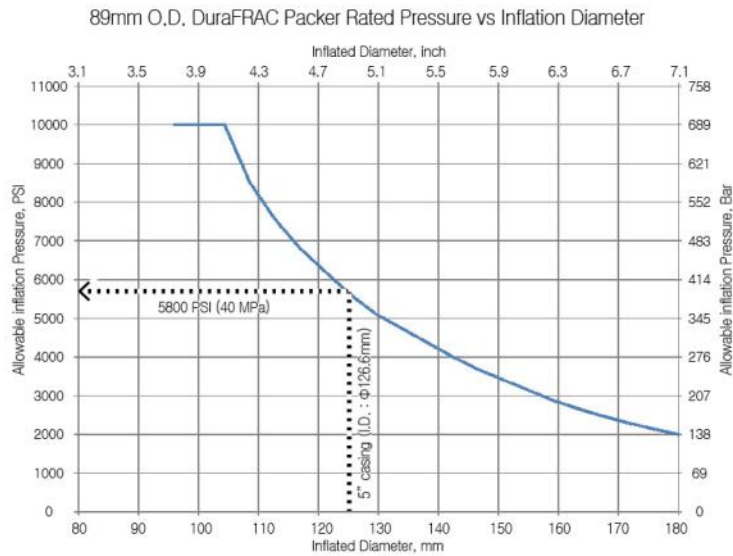


Fig. 9. Performance result of an urethane expansion packer.

### 주입탑 및 웰헤드(wellhead) 설치

주입탑은 수직형 또는 수평형으로 구분되며, 운영방식(유압식, 전기식)과 지하에 설치된 장비를 조정하고 주입과정을 관리하는 방식에 따라 추가적으로 분류된다. 주입탑은 지표에서 주입구간으로의 CO<sub>2</sub> 유동을 조정하는 주요 밸브의 집합체이다. 튜빙행거(tubing hanger)는 웰헤드 상부에 위치하며, 주입관 설치를 위한 주요 시설이다.

주입관은 지표에서 저장층으로 CO<sub>2</sub>를 운반하는 주요 통로이며, 이는 웰헤드 상부부터 저장층 상부까지 이어진다. CO<sub>2</sub> 주입 파이프라인을 주입정과 연결, 주입정 내 유체의 통로, 압력제어 등의 기능을 수행하기 위하여 주입탑을 설치하였다.

주입정의 8 inch( $\Phi$ 216.3 mm), 5 inch( $\Phi$ 139.8 mm) 케이싱에 연결되는 웰헤드는 CO<sub>2</sub> 주입 시 보조 모니터링 센서 설치를 위한 인입구가 배치되도록 API 규격으로 설계 및 제작하였다(Fig. 10).

제작 완료된 웰헤드를 기밀성 시험(seal test) 장비에 연결하여 인위적인 수압을 가하여 기밀성을 확인하였다. 웰헤드의 제작 설계압은 14 MPa(2,000 psi) 기준으로 제작되었고, 기밀성 시험은 설계압의 2배에 해당하는 28 MPa (4,061 psi)의 압력을 3분 이상 유지하며 누수 발생여부와 압력 변화를 관찰하였다. 측정결과 누수는 발생하지 않았으며, 수압의 변동에 의한 0.32 MPa의 미세한 압력 하강이 일어났으나 이는 과압에 의한 압력계 계기의 유동에 기인한 것으로 기밀성은 적절한 것으로 판정되었다.

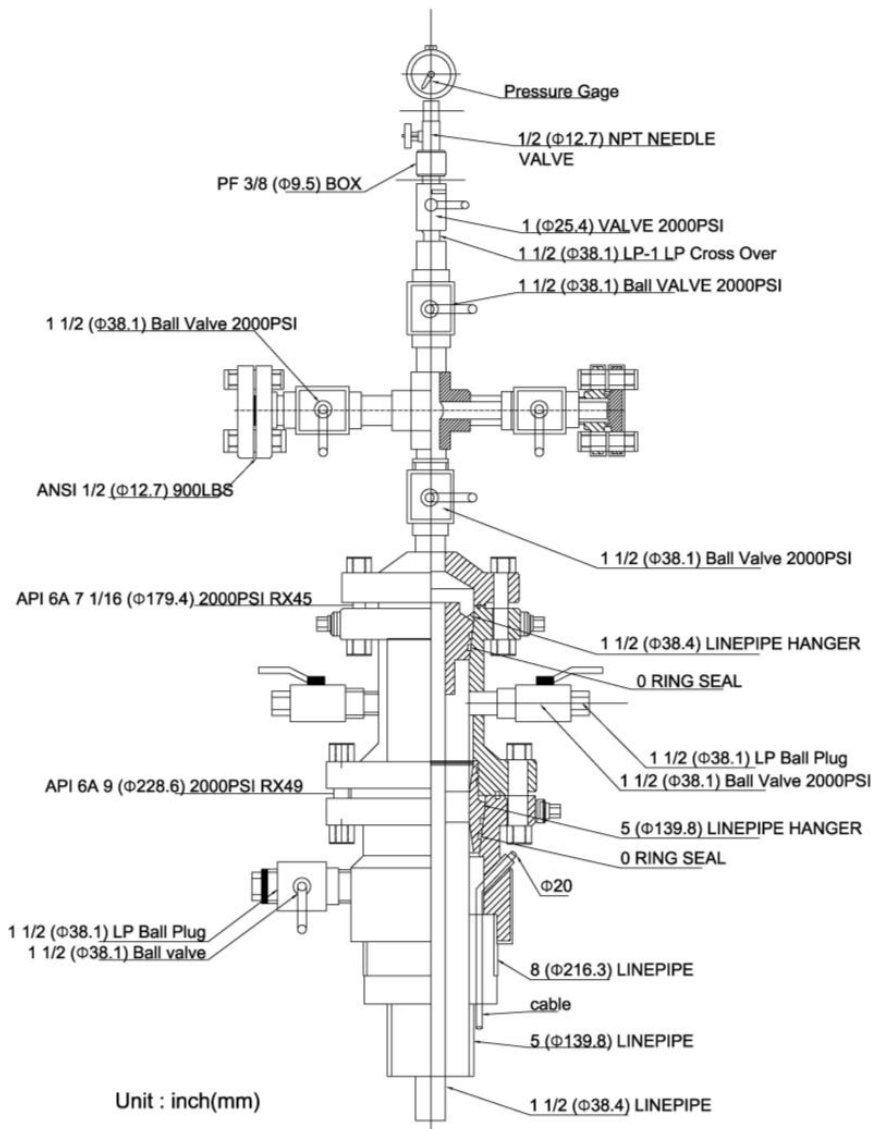


Fig. 10. Diagram of the christmas tree and wellhead.

주입탑은 주입관 1.5 inch( $\Phi$ 38.4 mm) 구경에 맞도록 제작하였으며, 상부에는 CO<sub>2</sub> 주입 및 물 주입 파이프 라인을 연결하고, 주입압력 측정 모니터링 시스템과 연결하여 실증 주입시 운영하였다(Fig. 11).





Fig. 11. Installation process of the christmas tree and wellhead.

## 결론

본 연구는 포항분지 해상에서 소규모 CO<sub>2</sub> 주입 실증을 위한 주입정 시추 및 완결을 목적으로 수행되었다. 주입정 위치는 포항분지 해상 지역으로 영일만내 포스코 방파제 인근에 위치한다.

본 연구에서 파악되고 확인된 사항은 다음과 같이 요약된다.

1. 주입정 시추는 탐사시추 결과를 바탕으로 지층별 암반상태를 감안하여 심도가 증가할수록 공경을 축소하는 단계별 굴진을 진행하였다. 주입구간 상부인 심도 756.5 m까지 최초 12 1/2 inch (Φ318 mm) 공경에서 시작하여 7 7/8 inch (Φ200 mm) 공경으로 굴진하고, 5 inch (Φ139.8 mm) 케이싱을 설치하여 공벽을 확보하였다. 주입구간인 심도 746.5~816.5 m 구간은 4 7/8 inch (Φ124 mm) 트리콘 비트 굴진, 4 inch (Φ114.3 mm) 슬롯 케이싱, 3 inch (Φ89.1 mm) 웨지 와이어 스크린을 설치하였다.
2. 시추가 완료된 주입정 내부로 CO<sub>2</sub> 주입을 위한 주입관과 상부로 CO<sub>2</sub> 누출을 방지하지 위하여 패커 및 주입탑을 설치하였다. CO<sub>2</sub>가 직접적으로 접촉하는 주입구간 상부 100 m구간의 5 inch (Φ139.8 mm) 케이싱, 주입관, 패커, 주입탑은 부식방지를 위하여 STS 316L 재질을 사용하였다.
3. 연구지역이 해상의 고립된 지역에 위치하는 관계로 접근성이 제한되고, 계절적 요인에 의하여 현장작업에 많은 어려움이 있었다. 이는 향후 대규모 CO<sub>2</sub> 지중저장을 위한 주입정 시추 및 완결에 필요한 제반조건에 대한 자료로 유용하게 사용될 것이다.



## 사사

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

## References

- API, 2016, Publications Programs Services, WA, U.S., API, 220 p.
- Barlet-Gouédard, V., Ayache, B., Rimmelé, G., 2008, Cementitious Material Behaviour under CO<sub>2</sub> environment, a laboratory comparison, In: Proceedings of the 4th Meeting of the Well Bore Integrity Network, Paris, France. 18-19 March 2008.
- Holloway, S., 1997, An overview of the underground disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 38, 193-198.
- Jonathan, B., 2010, Well completion design, *Development in Petroleum Science*, London, U.K., Elsevier, 711 p.
- Kim, J.C., Kim, J.-M., Kim, H.S., No, D.S., Bae, Y.S., Sim, S.J., Lee, K.Y., Lee, Y.M., Lee, C.H., Jeong, G.D., Heo, D.K., 2013, Carbon Dioxide Capture, Storage and Conversion Technology, Paju, Korea, Cheongmoongak, 586 p.
- Metz, B., Davison, O., de Coninck, H.C., 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, 431 p.
- Park, J.-Y., Kim, J.-M. and Yoon, S.-H., 2014, Three-dimensional geologic modeling of the Pohang Basin in Korea for geologic storage of carbon dioxide. *Journal of the Geological Society of Korea*. 51(3), 289-302 (in English abstract).
- Rahman, S.S., Chilingarian, G.V., 1995, Casing design theory and practice, *Development in Petroleum Science*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 372 p.
- 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, 265-285.
- Sohn, Y.K., Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Sedimentology*, 51, 1387-1408.
- United Nations, 2015, Adoption of the Paris Agreement. 21st Conference of the Parties, Paris, United Nations, 27 p.
- Wan, R., 2011, Advanced well completion engineering, Gulf Professional Publishing, 715 p.
- Yoon, S.-H., 2013, Offshore geologic cross-sections of the Pohang Basin, Korea. Unpublished Data, Jeju National University (JNU), Jeju, Korea, 6 sheets (in English).
- Yoon, W.S., 2015, Exploration drilling and core analysis for the geological storage of carbon dioxide into the Pohang Basin, Korea. Final Report, NexGEO, Seoul, Korea, 56 p.