

이산화탄소 지중저장을 위한 수리-역학 연동 해석 기술 개발 및 적용 - 슬라이프너 프로젝트

권상기*, 이혜지

Development of Hydro-Mechanical Coupling Method for CO₂ Sequestration and Its Application to Sleipner Project

Sangki Kwon*, Hyeji Lee

Abstract CO₂ sequestration for alleviating global warming is a hot issue in the world. In this study, TOUGH2 and FLAC3D were combined for analyzing the hydro-mechanical coupling behaviors expected in CO₂ sequestration and applied it to Sleipner project carried out in Norway. In the analysis, the influence of pore pressure on in situ stress was considered and the influence of caprock permeability on hydro-mechanical behaviors was analyzed. In the condition of constant injection rate, pressure and saturation at the injection well, liquid and gas saturation in rock, major and minor stress variations with time and distance from the injection well, and horizontal and vertical displacements after injection could be investigated. The major principal stress was quickly increased in the early stage and then slowly decreased to a stable value, which was higher than the initial value. In contrast, the minor principal stress returned to initial value after some increase in the early stage. Surface upheaval was steadily increased and it was up to 15mm in 2 years after injection. When the caprock's permeability was changed from 3e-15 m² ~ 3e-18 m², it was found that the injection well pressure and surface upheaval were inversely proportional to the permeability.

Key words CO₂ disposal, Hydro-mechanical, TOUGH2-FLAC, Caprock, Sleipner

초 록 세계 각국에서는 지구온난화 완화를 위한 이산화탄소 지중저장에 대한 관심이 높다. 본 연구에서는 이산화탄소 지중저장에 따른 수리-역학적 복합거동 해석을 위해 TOUGH2 와 FLAC3D 를 결합하고 이를 노르웨이 슬라이프너 프로젝트에 적용하였다. 수리-역학 해석에서는 공극압에 의한 현저응력의 변화를 고려하였으며 주입공 상부의 덮개암의 투수계수 변화에 따른 수리-역학적 영향을 분석하였다. 일정 속도로 이산화탄소를 주입하는 경우, 주입정에서의 압력 및 포화도 변화, 암반에서의 포화도 변화, 시간과 위치에 따른 암반에서의 최대주응력 및 최소주응력의 변화, 주입 후 수직변위 및 수평변위의 변화를 파악할 수 있었다. 최대주응력은 주입초기에 빠르게 상승한 후 서서히 낮아지다가 초기 응력보다 높은 값으로 수렴하는 경향을 보였으며 최소주응력은 초기에 빠르게 증가하다가 초기값으로 복귀하는 경향을 보였다. 주입이 진행됨에 따라 지표에서는 용기가 점진적으로 발생하며 주입 후 2년이 경과한 시점에서 최대 15 mm 의 수직변위가 발생하였다. 덮개암의 투수계수를 3e-15 m² ~ 3e-18 m² 까지 변화시키면서 해석을 실시한 결과, 주입초기에는 투수계수에 반비례하여 주입공 압력과 지표면 용기가 증가하였다.

핵심어 이산화탄소 지중저장, 수리-역학 해석, TOUGH2-FLAC, Caprock, 슬라이프너

Received: May. 22, 2017

Revised: Jun. 16, 2017

Accepted: Jun. 16, 2017

*Corresponding Author: Sangki Kwon

Tel) +82328607554, Fax) +82328727550

E-Mail) kwonsk@inha.ac.kr

INHA University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

1. 서론

대기 중 온실가스 배출의 급증으로 인한 지구 온난화 및 기상이변 초래 등 다양한 환경 관련 문제는 잠재적 위험요소에서 실질적인 위협이 되고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 온실가스 배

출량 증가로 인해 1990~2100년 사이에 지구의 평균온도는 1.4~5.8°C까지 상승할 수 있다고 경고하였다(IPCC, 2001). 이러한 지구온난화를 방지하기 위해 발전소, 제철소, 석유화학공장과 같이 화석연료를 사용하는 대규모 온실가스 배출원에서 포집한 이산화탄소를 압축·수송해 지질학적 구조에 저장하는 기술 개발이 다각도로 추진되고 있다. 특히 2020년 만료 예정인 교토의정서 이후의 신기후체제 수립을 위해 2015년 12월 발표된 파리기후협정(Paris Agreement)에 따라 우리나라를 포함한 196개 협약 당사국은 온실가스 감축 의무를 부담하게 되었다. 파리기후협정에서는 지구 기온 상승을 2°C 이하로 유지하고 가능한 1.5°C 이하까지 제한하기 위해 온실가스 감축만이 아니라 관련 기술이전, 역량배양, 투명성 등 포괄적인 노력을 요구하고 있다(환경부, 2016). 세계 7위의 온실가스 배출국인 우리나라의 감축목표는 2030년 온실가스 배출 전망치인 8.5억톤 대비 37%에 해당하는 3.1억톤으로 향후 5년 단위로 파리협정 이행에 대한 점검을 실시할 계획으로 있다(권이균, 2016).

일반적으로 이산화탄소는 회수공정을 통하여 회수된 후 순수한 이산화탄소로 분리한 후 이를 가압시켜 농축하고 농축된 이산화탄소는 파이프라인이나 수송선을 통하여 저장소까지 이송된다. 수송된 이산화탄소는 해양, 지중, 지표에 저장될 수 있으나 해양저장은 해양 생태계를 교란시킬 수 있고 지표저장은 이산화탄소를 고착화시킨 광물의 저장소 문제가 있다(박상도, 2009). 따라서 이산화탄소를 유·가스전, 대수층, 석탄층 등과 같은 지중 저장소에 강제적으로 주입하여 오랜 기간 동안 누출되지 않도록 가두어 두는 지중저장 방법을 선호하고 있다. 노르웨이, 미국, 캐나다, 호주 등 세계 각국에서는 이산화탄소 지중저장을 위한 실용화 사업을 진행하고 있다. 노르웨이에서 수행한 슬라이프너 프로젝트에서는 북해 가스전에서 생산된 천연가스의 상업성을 향상시키기 위하여 천연가스에 포함되어 있는 이산화탄소를 분리하고 이를 다시 해저 깊이 0.8~1 km에 위치한 염대수층에 주입하여 저장하고 있다. 슬라이프너 프로젝트를 통해 1996년 이후 일 평균 약 3,000톤, 연간 백만톤의 이산화탄소를 해양지중의 염대수층에 주입 및 저장하였다(Torp and Gale, 2004).

이산화탄소의 지중저장과 석유나 가스의 생산을 연계시키는 방법에 대한 연구도 수행되고 있다. 미국과 캐나다는 미국 노스다코타(North Dakota)의 석탄가스화 시설로부터 포집된 이산화탄소를 파이프라인을 통하여 수송하고, 이를 석유회수증진법(EOR)을 통하여 캐나다 남부와 미국 북부에 걸쳐있는 윌리스턴(Williston) 분지 유전에 주입하는 웨이번(Weyburn) 프로젝트를 수행하였

다(권이균, 2016).

국내의 경우, 2000년도부터 이산화탄소포집저장(CCS) 기술 개발을 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다. 2020년까지 1만톤급 이산화탄소 실증 저장과 모니터링을 통해 저장기술의 상용화 인프라를 구축하기 위한 사업이 추진되고 있으며 향후 100만톤급 이산화탄소 지중저장 실증을 위한 추진계획이 발표된 바 있다(윤태섭 등, 2016).

지하 심부 암반에 이산화탄소를 장기적으로 안전하고 안정한 상태로 저장하기 위해서는 지중 저장소의 상부 덮개암(cap rock)의 밀폐성을 확보하는 것이 지중저장의 기술적 타당성 및 안전성 측면에서 핵심 기술이 될 것이며 이와 관련하여 덮개암의 균열발생 가능성을 포함한 역학적 안정성을 평가하기 위해서는 고심도 암반에서 예상되는 복합거동을 이해하는 것이 중요하다. 1,000 m 이상의 고심도에 주입된 이산화탄소는 초임계 유체(supercritical fluid) 상태로 존재하기 때문에 거동이 매우 느리고 그 사이에 주변 지층이나 지중 유체와 반응하여 고착 또는 용해된다. 또한 고심도 암반에 작용하는 높은 압력과 지열의 영향을 받기 때문에 이산화탄소의 지중저장을 위해서는 (1) 다상지중 유체의 수리학적 유동 (2) 지질매체의 역학적 변형 (3) 지열에너지의 열적 이동 (4) 광물의 용해 작용이 연동되는 열-수리-역학-화학적(Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical, THMC) 현상을 이해해야 한다. 특히 이산화탄소의 주입에 의해 야기될 수 있는 인근 단층의 이동과 이에 따른 지진의 발생 가능성을 평가하여야 한다. 저류층 암반의 거동 예측 및 안정성 확보 여부는 환경에도 영향을 미친다. 알제리 Salah에서는 CO₂ 주입에 따라 초기 3년간 15 mm의 지반용기가 보고된 바 있다(Vasco et al., 2008).

Table 1은 균열 암반에서의 THMC 상호 작용에 관계되는 메카니즘을 보여준다. 이산화탄소 지중저장을 위한 목적으로 세계 각국에서 수행되고 있는 THMC 해석은 지하 암반 내 덮개암의 안정성 평가에 활용된다. 이산화탄소 주입에 따른 덮개암에서의 균열발생과 시추공의 안정성 확보를 위한 암반공학적인 연구에서는 유압에 의한 암반의 변형 및 단층 또는 균열이 유체의 이동에 미치는 영향에 대한 해석적 접근을 수행하고 이를 적합한 부지선정에 활용하고 있다.

세계 각국 연구진은 다양한 접근법을 사용하여 이산화탄소 지중저장을 위한 THMC 해석을 수행하고 있다. 연구진들은 TOUGH2+FLAC(Rutqvist et al., 2010), STOMP+ABAQUS (Carroll, 2011), TOUGH2+CODE_ASTER(Loschetter et al, 2012)와 같은 기개발된 코드들을 연계해서 사용함으로써 각 코드의 장점을 살리면서도 효율적인 THMC 해석기법을 개발하고 다양한 분

Table 1. THMC coupling expected in rock mass

Thermal (T) Parameter : temperature	Mechanism : water property change, buoyance	Mechanism : thermal stress	Mechanism : equilibrium and reaction kinetics
Mechanism : heat convection	Hydrological (H) Parameter : flow	Mechanism : effective stress	Mechanism : mass transfer
Mechanism : thermal property change	Mechanism : change of density and aperture	Mechanical (M) Parameter : stress, deformation, fracturing	Mechanism : modified reactive surface area
Mechanism : chemical reaction	Mechanism : permeability alteration	Mechanism : healing/weathering/dissolution	Chemical (C) Parameter : reaction kinetics

야에 적용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 국내에서는 이산화탄소 지중저장을 위한 해외 연구현황 조사 및 기술들이 소개되고 있다. 김형목 등(2008)은 이산화탄소 지중저장과 관련하여 암반공학적 쟁점을 소개하였으며 김현우 등(2013)은 이산화탄소 지중저장에 따른 단층 안정성 평가와 관련된 연구사례를 소개한 바 있다. 국내 이산화탄소 지중저장을 위한 다양한 연구가 수행되고 있으나 아직 구체적인 연구 성과 발표는 미미한 상황이다. 본 연구에서는 이산화탄소 지중저장에 적용하기 위하여 TOUGH2와 FLAC을 연계한 THM 해석 기법을 개발하고 이를 노르웨이 슬라이프너 프로젝트에 적용하여 다양한 조건에서의 덮개암의 안정성을 평가하고자 하였다.

2. THM 해석 기술

2.1 해석 코드

본 연구에서는 열-수리해석에서 뛰어난 성능을 발휘하는 TOUGH2 코드와 역학 해석에서 효율성이 뛰어난 FLAC3D를 연계하여 사용함으로써 심지층 암반에서의 THM 연동 해석 기법을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 FLAC3D-TOUGH2 해석 기법에서는 포화도에 따른 매질의 열-수리-역학적 물성 변화를 고려할 수 있도록 작성되었다(권상기 등, 2015). TOUGH2 와 FLAC3D의 특성은 다음과 같다.

- TOUGH2 : TOUGH2는 불포화 매질에서의 다상 (multiphase) 및 다성분(multicomponent) 유체 혼합물의 다차원(multi-dimensional) 열-수리-화학 해석을 수행할 수 있는 코드로 미국 LBNL 에서 개발되어 전세계적으로 사용되고 있다. 다양한 종류의 EOS(Equation Of State) 모듈을 제공함으로써 유체의 특성과 조건에 맞는 해석을 수행할 수 있으며

미국 고준위 방사성폐기물 처분장 프로젝트를 비롯하여 이산화탄소 지중저장, 지열개발 등에 널리 사용되고 있다. 이산화탄소 지중 저장을 위한 모듈인 ECO2N, ECO2M 을 제공하고 있다. ECO2N 과 ECO2M 은 물, 소금, 이산화탄소에 대하여 열-수리 거동을 모사할 수 있으며 특히 ECO2M은 이산화탄소의 기체-액체의 상변화를 고려할 수 있다(Pruss, 2011).

- FLAC3D : FLAC3D는 유한차분법을 기반으로 하는 3차원 지반 및 터널 구조해석 프로그램으로 암반, 흙, 구조물의 역학적 해석을 위한 2차원/3차원 연속체 해석 프로그램이다. 미국 Itasca 사에서 개발하였으며 자체 프로그래밍을 위한 FISH 기능을 가지고 있다. 지하수 해석 및 간극수압을 통한 유효응력 해석이 가능하며 유체 흐름을 고려한 수리-역학 연동해석 기능을 제공한다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 TOUGH2와 FLAC3D를 연계한 THM 해석의 흐름도를 보여준다. TOUGH2

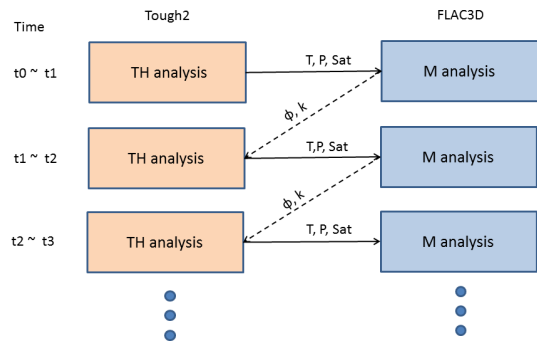


Fig. 1. Calculation flow for THM coupling using TOUGH2 and FLAC3D

Table 2. Pore pressure stress coupling ratios obtained from measurements at different reservoir sites (Altmann, 2010)

Area	Scale	$\Delta\sigma_h/\Delta P$
Scotian shelf, Canada	Over-pressured basin	0.76
North West shelf, Australia	Over-pressured basin	0.75
Gannet and Guillemot fields, North Sea	Over-pressured basin	0.60
Vicksburg formation, South Texas	Depletion in field	0.48
Travis Peak formation, East Texas	Depletion in field	0.57
Alberta basin, Western Canada	Depletion in field	0.3
Ekofisk field, North Sea	Depletion in field	-0.8
US Gulf Coast	Depletion in field and Over-pressured basin	0.46
Lake Maracaibo, Venezuela	Depletion in field	0.56
Baram Delta Province, Brunei	Depletion in field and Over-pressured basin	0.59
Magnus field, North Sea	Depletion in field	0.68
West Sole field, North Sea	Depletion in field	1.18
Wytch Farm field, UK	Depletion in field	0.65
Venture field, Canada	Over-pressured basin	0.56
Nile Delta, Egypt	Over-pressured basin	0.65

에서 TH 해석을 수행하여 이산화탄소의 이동, 온도, 압력, 포화도 변화 등을 얻고 이 중에서 역학적 해석에 영향을 주는 온도, 압력, 포화도 변화를 추출하여 FLAC3D를 이용한 M해석의 입력자료로 사용할 수 있다. 역학적 해석의 결과로 변화하는 공극률과 투수계수의 변화는 TOUGH2의 입력값으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 주입되는 이산화탄소의 온도가 주입지점 암반의 온도와 유사하다는 가정하에 열적 거동에 의한 영향은 고려하지는 않았으며 수리해석의 결과에 따른 역학적 거동 변화를 중점적으로 관찰하기 위해 역학적 해석의 결과가 수리해석에 피드백 되는 과정은 생략하였다.

2.2 공극압과 응력의 관계

유체의 주입이나 생산에 따라 공극압은 변화하며 공극압의 변화는 유효응력(effective stress)을 변화시킴으로써 암반의 안정성에 영향을 미치게 된다. Addis(1997)은 유효응력 개념을 확장하여 공극압과 응력이 연계될 수 있음을 주장하였으며 Engelder와 Fisher(1994)는 (a) 수직응력은 일정하고 (b) 수평으로 무한한 저류층에서 (c) 수평응력이 0이고 (d) 최대수평응력과 최소수평응력의 변화가 동일하다는 가정하에 공극압 변화에 의한 수평응력의 변화를 아래 식으로 구할 수 있음을 보였다.

$$\frac{\Delta\sigma_h}{\Delta P} = \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} = R \quad (1)$$

여기서 α 는 Biot coefficient이고 ν 는 포아송비를 의

미한다. 포아송비가 0.25이고 $\alpha=1$ 인 경우, $R=0.67$ 로 계산된다. 즉 압축응력을 양의 값으로 표현하는 경우, 공극압 1 MPa 증가 시 수평응력은 0.67 MPa 증가한다는 것을 의미한다(Altmann et al., 2010). Table 2는 세계 각국의 저류층에서 측정된 공극압 변화와 응력 변화 사이의 비율을 보여준다. 0.3~1.18 사이에 놓이며 평균 0.64로 나타난다.

Sayers(2006)의 연구에서는 공극압의 변화가 수평응력 뿐 아니라 수직응력에도 영향을 준다는 것을 보였으며 이러한 경향은 모델링을 통해서도 나타났다(Herwanger and Horne, 2005, Sen and Settari, 2005). 본 연구에서는 공극압의 변화가 수평응력 뿐 아니라 수직응력에도 일정 정도의 영향을 주는 것으로 가정하고 해석을 실시하였다.

3. 슬라이프너 프로젝트

이산화탄소 지중저장을 위한 세계 최초의 상용 프로젝트가 수행되고 있는 슬라이프너 부지는 노르웨이 북해 연안에서 250 km 떨어진 곳에 위치하며 사암과 셰일층으로 구성되어 있다(Fig. 2). 1996년 이후 1000 m 심도에 위치한 사암층에 천공된 수평공을 통해 년 1백 만톤에 달하는 이산화탄소가 주입되었다. Fig. 3은 슬라이프너 프로젝트의 개념도를 보여준다. 이산화탄소가 주입되는 Utsira 사암층의 두께는 200~300 m이며 공극률은 30~42% 내외로 조사되었다. 지층 내의 지하수는 염수(salt water)이다. 지층의 투수계수(permeability)

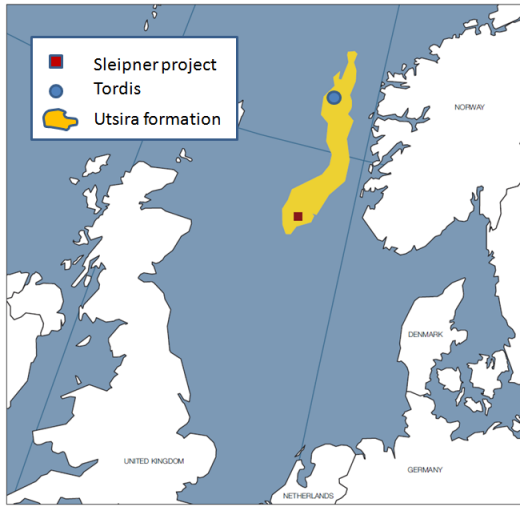


Fig. 2. Location of Sleipner site

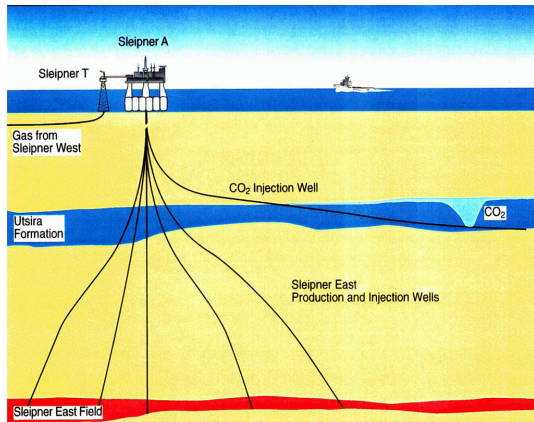


Fig. 3. Injection concept at Sleipner (Torp and Gale, 2004)

는 1~3 darcy이며 광물조성은 석영(~75%), potassium feldspar(~13%), 방해석(~3%), albite(~3%) 등으로 구

성된다. 슬라이프너 프로젝트는 이 지역에서 천연가스를 생산하는 StatoilHydro 사에 의해 수행되었다. 이산화탄소는 초임계(supercritical) 상태로 주입된다. 초임계 상태란, 이산화탄소가 임계온도(31°C)와 압력(73 atm)을 초과하는 조건에서 기스와 액체의 특성을 가지고 있는 상태를 의미한다. 주입공 선단에서의 온도는 25°C로 측정되었으며 주입 지점에서의 온도는 48°C로 추정되었다(Alnes et al., 2011). 주입압은 주입지점에서의 압력과 같은 11 MPa 이다. 이산화탄소가 주입되는 7년 동안 10 cm 이상의 수직변위가 관찰되었다(Alnes et al., 2011). Table 3은 슬라이프너 프로젝트에서 수행된 조건을 보여준다.

4. 수리-역학 연동 해석

4.1 초기조건 및 경계조건

이산화탄소의 이동 해석에 적합한 TOUGH2의 ECO2N 해석 모듈을 사용하였다. 초기조건으로는 온도 37°C, salt mass fraction(염분 질량비)은 0.032, 이산화탄소의 질량비는 4.54e-4로 설정하였다. 이산화탄소는 110 bar의 압력으로 초당 0.238 kg이 주입되는 것으로 가정하였다. 기존의 연구(Johnson et al., 2004)에서 사용된 지질정보를 바탕으로 주입 지류층 상부에 30 m 두께의 사암층과 3 m 두께의 4개의 세일층이 교차로 존재하고 있으며 이들의 상부에는 약 30 m 두께의 cap rock 이 존재하는 것으로 가정하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 격자망을 보여준다. 해석 영역은 가로 6 km, 세로 1022 m이며 총 1421개의 요소로 구성되어 있다. 주입공 주변을 조밀하게 구성하여 보다 상세한 거동을 볼 수 있도록 하였다. 수리-역학 모델링은 이산화탄소 주입 2년 동안의 변화에 대하여 수행하였다. 주입공은 지표면에서 1000 m 심도에 위치하며 모델격자망에서는 바닥에서 22 m 떨어진 지점에 위치하고 있다. 격자망의 상부는 해저면으로 수심 100 m 해수에 의해 약 1 MPa의

Table 3. Conditions at Sleipner project.

Parameters	Conditions
Injection rate	0.238 kg/sec
Initial temperature	37°C
Geothermal gradient	3.3°C/100 m
Injection pressure	11 MPa
Injection depth	1000 m
Temperature at injection well	48°C
Sea depth	100 m

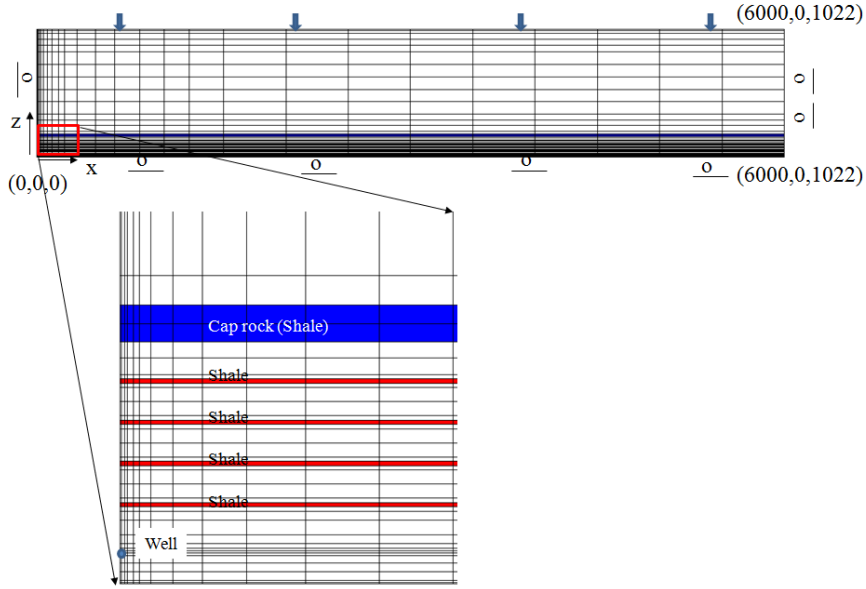


Fig. 4. Model mesh

압력이 작용하고 있는 것으로 묘사하였으며 나머지 경계면에서는 범위구속을 시켰다. 초기응력은 정수압 상태로 가정하였다.

4.2 물성

슬라이프너 부지 Utsira 지층의 암석코어를 이용한 실험실 실험을 통해 측정된 공극률은 35%~42.5%로 나타났으며(Torp and Gale, 2004) 본 연구에서는 35%를 사용하였다. 세일층의 경우 10.25%를 사용하였다. 상대 투수계수(Relative permeability)는 van Genuchten-Mualem 모델을 사용하였다(Pruss et al., 1999).

액체의 상대투수계수(k_{rl})는 다음과 같이 구해진다.

$$k_{rl} = \begin{cases} \sqrt{S^*} [1 - (1 - (S^*)^{1/\lambda})^\lambda]^2 & \text{if } S_l < S_{ls} \\ 1 & \text{if } S_l \geq S_{ls} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $S^* = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr})$

가스의 relative permeability(k_{rg})는 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$k_{rg} = \begin{cases} 1 - k_{rl} & \text{if } S_{gr} = 0 \\ (1 - \hat{S})^2 (1 - \hat{S}^2) & \text{if } S_{gr} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

여기서

$$\hat{S} = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr}) \text{이다.}$$

Capillary pressure(P_c)는 다음의 van Genuchten 함수를 사용하였다.

$$P_c = -P_0 [(S^*)^{1/\lambda} - 1]^{1-\lambda} \quad (4)$$

여기서 $\frac{1}{P_0} = \frac{\alpha}{\rho_w g}$ 이다.

위 식에서

k_{rl} = 액체의 상대투수계수

S_l = 액체의 포화도

S_{lr} = 액체의 잔류포화도

K_{rg} = 가스의 상대투수계수

S_{gr} = 가스의 잔류포화도

λ = van Genuchten-Mualem 상수 (m)

α = van Genuchten 상수 (1/kPa)

본 해석에서 사용한 저류층 사암과 세일층의 수리-역학적 물성은 Table 4와 같다.

Table 4. THM properties of sandstone and shale

THM properties	Properties	Reservoir (sandstone)	Shale
Mechanical	Model	Elastic	Elastic
	Young's modulus(MPa)	1e4	5e3
	Poisson's ratio	0.3	0.3
Physical	Porosity (%)	35	10.25
	Density (kg/m ³)	2600	2600
Hydraulic	Capillary pressure (van Genuchten-Mualem)	$\lambda=0.4$ $P_0=3.58kPa$ $P_{max}=1e7$ $S_{lr}=0.2$	$\lambda=0.4$ $P_0=62kPa$ $P_{max}=1e7$ $S_{lr}=0.2$
	Permeability (m ²)	3e-12	3e-15-3e-18
	Relative permeability (van Genuchten)	$\lambda=0.4$ $S_{lr}=0.2$ $S_{ls}=1.0$ $S_{gr}=0.1$	$\lambda=0.4$ $S_{lr}=0.2$ $S_{ls}=1.0$ $S_{gr}=0.1$

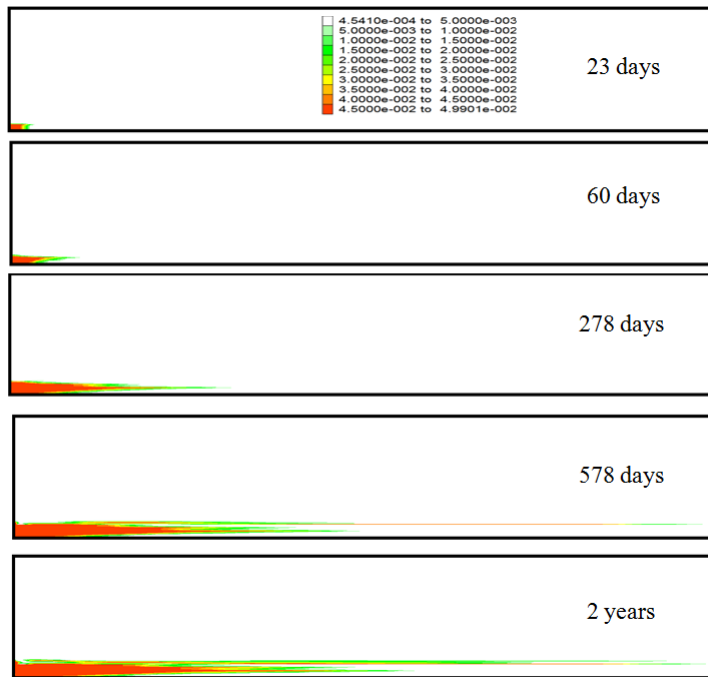


Fig. 5. Distribution of fraction of CO₂ (XCO₂) at different times after injection

4.3 HM 해석 결과

수평공으로 주입되는 이산화탄소의 주입에 따른 수리-역학적 거동을 평가하기 위해 TOUGH2-FLAC을 이용한 2차원 해석을 실시하였다. 뒷개암과 뒷개암 아래에 위치하는 4개의 세일층의 투수계수는 3e-15 m²로 설정하였다.

4.3.1 TOUGH2 수리 해석 결과

Fig. 5는 TOUGH2 수리해석을 통해 얻어진 CO₂의 fraction 변화를 보여준다. 시간의 경과에 따라 점진적으로 이산화탄소가 수평방향으로 퍼져나가고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 주입공 상부 세일층에서 시간에 따라 발생하는 압력의 변화를 보여준다. 주입공에서는 이산화

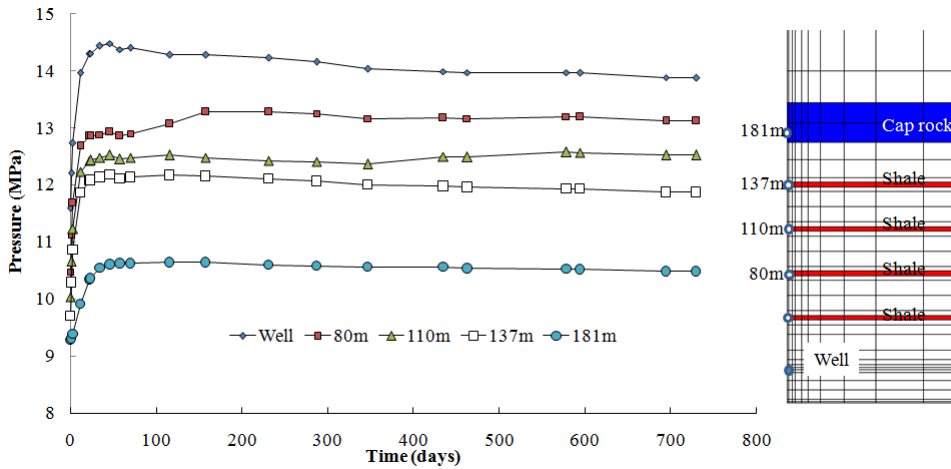


Fig. 6. Pressure change with time at shale layers after CO₂ injection

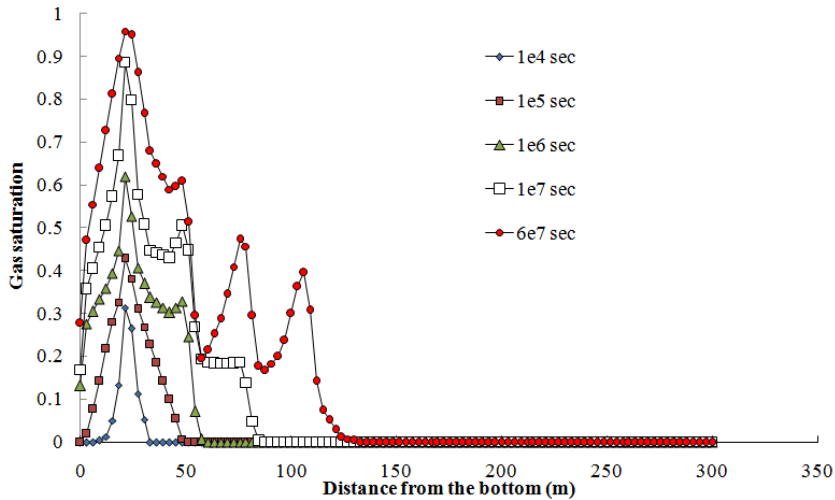


Fig. 7. Gas saturation change with time and vertical distance from the bottom of the model

탄소 주입 초기에 빠르게 증가하다가 46일 경과 후, 최대 14.5 MPa 정도의 압력이 발생하며 시간의 경과에 따라 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 0.238 kg/sec로 설정된 주입속도와 관련되는 것으로 판단된다.

주입공에서 멀어질수록 증가하는 압력의 크기가 줄어들고 있으며 투수성이 낮은 셰일층의 영향으로 압력의 변화 양상이 위치에 따라 약간의 차이를 보임을 알 수 있다. Fig. 7은 주입후 시간대별 가스포화도의 변화를 보여준다. X 축은 바닥에서 주입공을 지나는 수직방향으로의 거리를 나타낸다. 매 시간대에서 주입공이 위치하는 22 m 지점에서 가스포화도가 가장 높게 나타나고

있다. 초기에는 가스포화도도 낮고 변화하는 구간의 폭도 비교적 적지만 시간이 경과함에 따라 최대 가스포화도도 증가하며 변화구간의 범위도 넓어지고 있음을 알 수 있다. 특히 시간의 경과에 따라 상부 셰일층의 영향이 뚜렷이 나타나며 이들 층의 영향으로 가스포화도는 복잡한 양상을 보이고 있다. Fig. 8은 주입정에서의 시간 경과에 따른 포화도 변화를 보여준다. 가스포화도의 지속적인 증가에 따라 Liquid 포화도는 0.7에서 낮아지다가 100일 경과한 이후에는 0.1에서 안정화되는 것으로 나타난다.

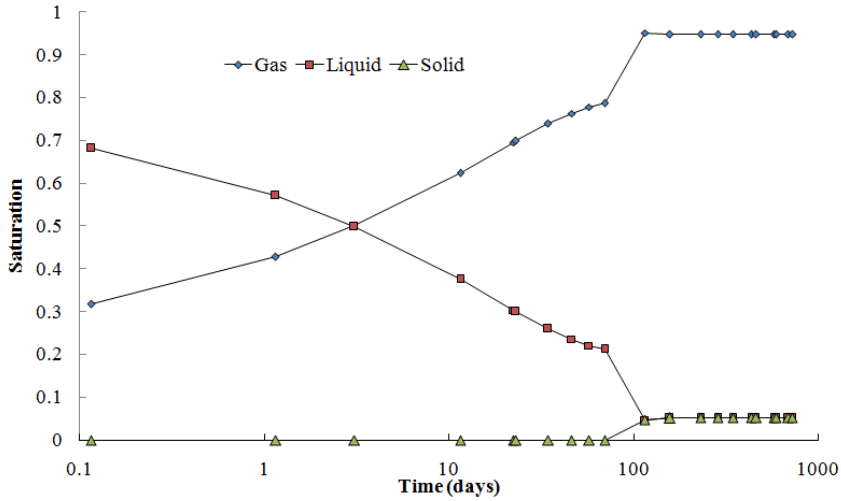


Fig. 8. Variation of saturation with time at the injection well

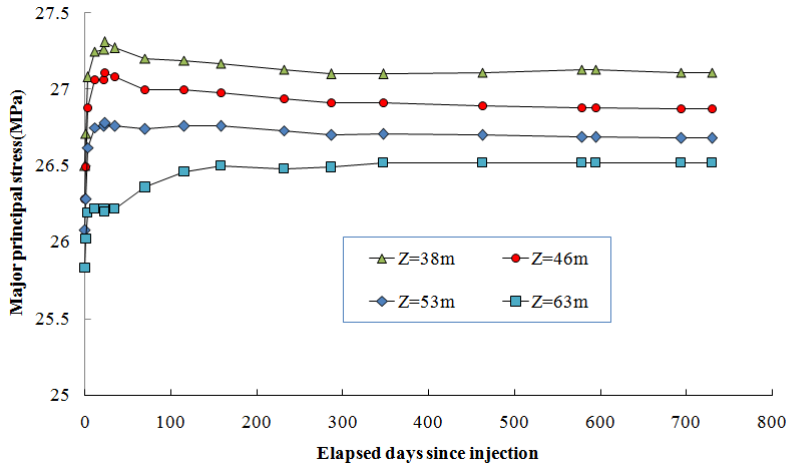


Fig. 9. Variation of major principal stress with time at the locations along the vertical line through the injection well

4.3.2 HM 해석 결과

TOUGH2를 이용한 해석을 통해 얻어진 압력, 온도, 포화도 자료는 추출하여 FLAC의 초기값으로 사용할 수 있도록 프로그램을 작성하였다. FLAC을 이용한 역학 해석을 통해 응력, 변위 변화를 계산하여 덮개암의 안정성을 평가할 수 있다. HM 해석에서는 식 (1)에 있는 공극압 변화($\Delta\sigma$)에 따른 수평응력 및 수평응력 변화 (ΔP) 비는 세계 여러 곳에서 실측된 응력변화/공극압의 평균값인 0.64를 사용하였다. TOUGH2를 이용한 열-수리 해석에서 계산되는 공극압 변화를 파악하여 수직 및 수평응력을 수정한 후 역학해석을 수행하였다. Fig.

9는 주입 후 경과시간에 따른 수평 주입정 상부에 위치한 여러 지점에서의 최대주응력 변화를 보여준다. 주입정이 Z=22 m에 위치하고 있으므로 Z=38 m 지점은 주입공 상부 16 m를 의미한다. 주입공에서 가까운 지점에서는 최대주응력이 빠르게 상승하여 최고값에 도달한 이후 서서히 낮아지다가 안정된 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 초기값에 비해 0.5~1.5 MPa 까지의 주응력 상승이 나타남을 알 수 있다. Fig. 10은 수평거리에 따른 최대주응력 변화를 보여준다. 수평거리에 따라 최대주응력의 시간에 따른 변화 양상이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 주입공에서 가까운 지점에서는 주입 초기

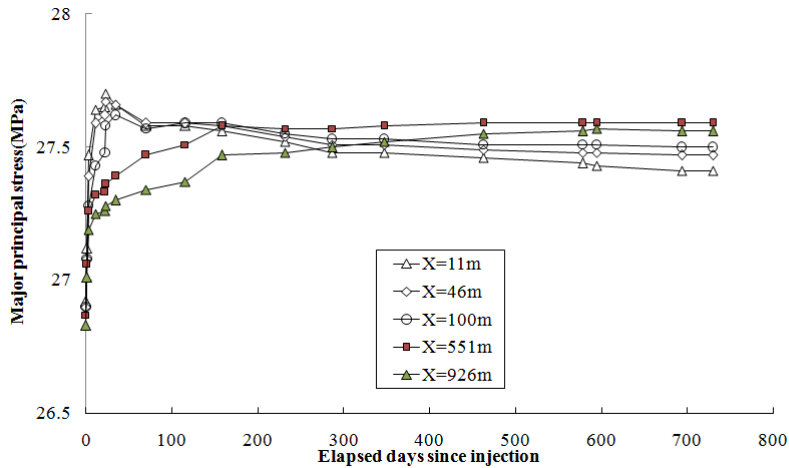


Fig. 10. Variation of major principal stress with time at different horizontal distances from the injection well

에 최댓값에 도달한 후 서서히 낮아지는 경향을 보이며 주입공에서 먼 지점에서는 응력이 서서히 증가함을 알 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 주입공 직상부와 주입공에서 수평방향으로의 거리에 따른 최소주응력 변화를 보여준다. 최소주응력은 초기에 빠르게 증가한 후 초기 응력 값에 가깝게 복귀하는 경향을 보인다. 본 해석 조건에서는 수직응력이 최소주응력이 되며 이는 응력의 발생이 지표면 방향으로의 변위로 서서히 해소되기 때문으로 판단된다. 초기응력을 정수압 상태로 가정한 현재 조건에서는 주입후 최대 최소주응력의 차이가 1 MPa 내외로 나타나기 때문에 이산화탄소 주입이 암반의 안정성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 13은 주입후 2년이 경과한 시점에서 발생하는 총 변위의 벡터값과 Z 방향으로의 수직변위 등고선도를 보여준다. 최대 수직변위는 약 1.5 cm로 나타나며 주입공 주변에서는 상부방향과 측면 방향으로의 변화가 나타나며 주입공 직상부에서는 수직변위가 우세하게 나타남을 알 수 있다. 암반 내 변위 분포가 균질하게 나타나지 않는 이유는 여러 층으로 구성된 세일층의 영향으로 인한 불균질한 이산화탄소 분포와 관련되는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 주입공 직상부에 위치한 지점들에서의 시간에 따른 수직변위 변화를 보여준다. 주입공에서 가까운 지점에서는 수직변위가 초기에 발생한 이후 안정화되는 양상을 보여주지만 지표면에서는 변위가 누적되어 나타나며 시간의 경과에 따라 점진적으로 상승하는 것으로 나타난다. 주입공 직상부 지표에서는 주입 후 2년이 경과한 시점에서 10 mm 이상의 수직변위가 발생

하는 것으로 나타났다. Fig. 15는 주입공 위치에서 수평 방향으로 거리에 따른 수평변위 발생을 보여준다. 수직 변위에 비해 크기는 않지만 주입공에서 176 m 떨어진 지점에서 최대 수평변위(0.6 mm)가 발생하는 것으로 나타나며 주입 초기에 최댓값에 도달한 이후 서서히 감소하는 경향을 보인다. 이는 주입된 이산화탄소가 수평 방향으로 이동하면서 발생하는 압력에 의한 영향으로 판단된다. 주입공에서 476 m 떨어진 지점에서의 수평 변위는 2년 경과한 시점까지 점진적으로 증가하는 양상을 보이지만 추후 이산화탄소의 주입에 따라 수평변위는 비슷한 양상으로 감소할 것으로 판단된다.

4.3.3 덮개암 투수계수의 영향

덮개암의 투수계수에 따른 수리-역학적 거동 변화를 파악하기 위해 투수계수를 $3e-15m^2 \sim 3e-18m^2$ 까지 변화시키면서 해석을 실시하였다. Fig. 16은 각 경우에서 시간에 따른 주입공에서의 압력변화를 보여준다. 본 해석에서와 같이 주입속도를 일정하게 설정하는 경우, 주입공에서의 압력은 주입초기에 급속하게 증가하다가 약 40~50일 사이에 최대압력에 도달한 후 시간 경과에 따라 서서히 낮아지는 경향을 보인다. 이는 주입속도를 일정하게 유지하기 위해서는 주입 초기에는 주입압력을 빠르게 증가하다가 일정 시간이 경과한 후에는 주입압력을 서서히 감소시켜야 한다는 것을 의미한다. 반대로 주입압력을 일정하게 유지하는 경우, 일정 시간 이후에는 시간의 경과에 따라 주입량은 서서히 증가할 것으로 유추할 수 있다. 주입공 압력은 덮개암의 투수계수가 낮아짐에 따라 증가함을 알 수 있다. $K=3e-18 m^2$

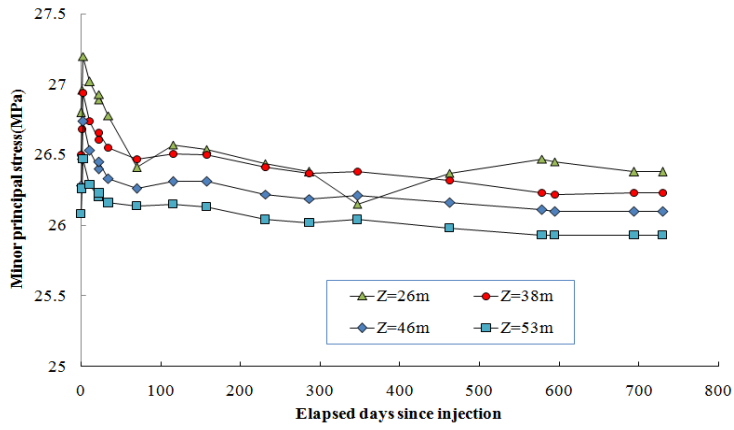


Fig. 11. Variation of minor principal stress with time at the locations along the vertical line through the injection well

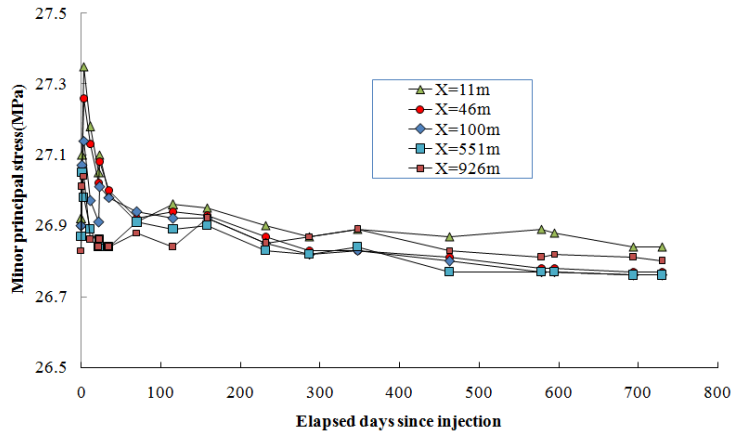


Fig. 12. Variation of minor principal stress with time at different horizontal distances from the injection well

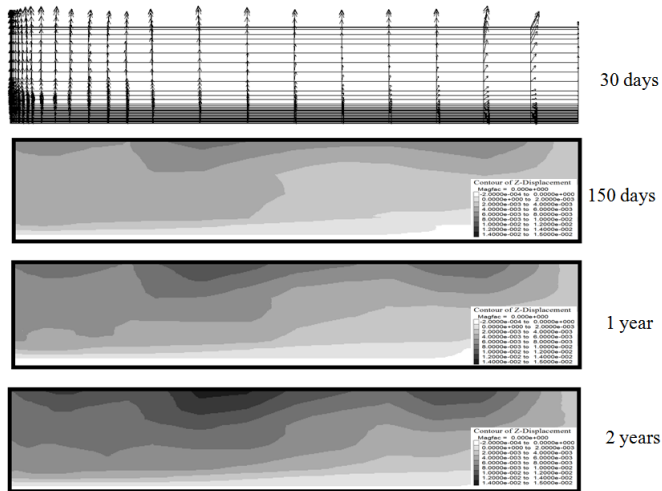


Fig. 13. Plot of displacement vector and vertical displacement contours at different times

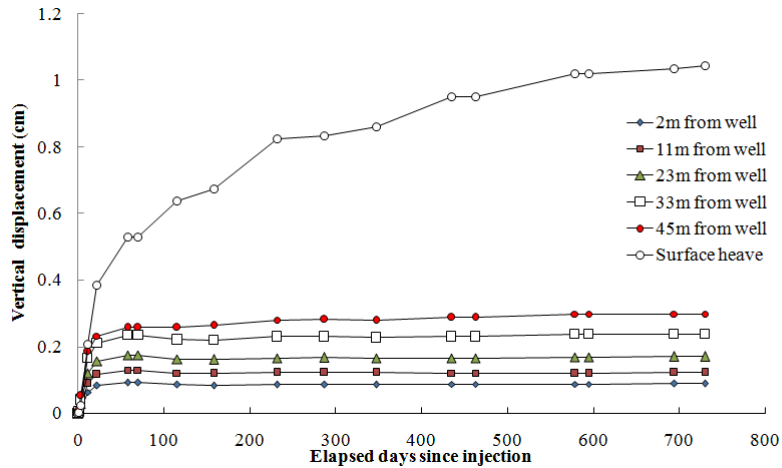


Fig. 14. Variation of the vertical displacement with time at the locations with different vertical distances from the injection well

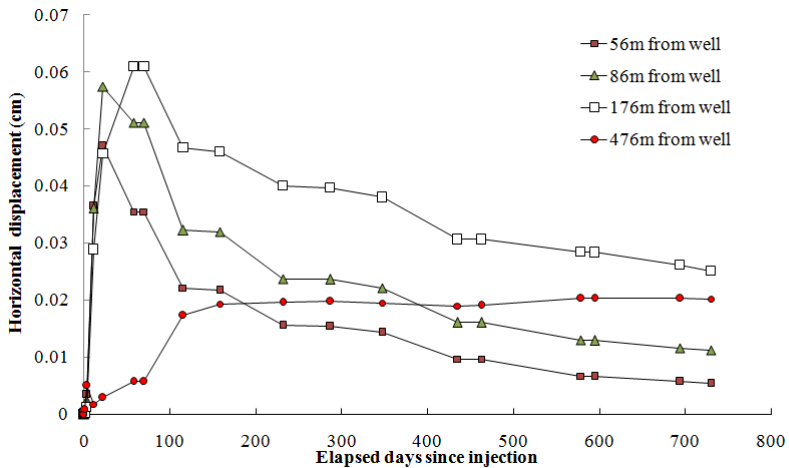


Fig. 15. Variation of the horizontal displacement with time at the locations with different horizontal distances from the injection well

인 경우와 $K=3e-17 \text{ m}^2$ 인 경우, 압력의 차이는 상대적으로 크지 않으며 반면 $K=3e-15 \text{ m}^2$ 인 경우에는 주입공에서의 압력 차이가 크게 나타나고 있다. Fig. 17은 덮개암의 투수계수가 시간에 따른 지표 용기에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림에서 지표 용기는 주입공 직상부 지표면에서의 수직변위를 의미한다. 주입 초기에는 투수계수가 낮을수록 더 많은 지표 용기가 발생하지만 2년이 경과한 시점에서는 $K=3e-17 \text{ m}^2$ 에 비해 $K=3e-15 \text{ m}^2$ 에서 더 많은 지반용기가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 주입초기에는 투수계수에 반비례하여 압력이 증가하지만 시간의 경과에 따라 이산화탄소의 수직 및 수평방향으로의 이동이 발생하면서 암반에서의 응

력변화 및 지표용기 양상이 좀 더 복잡한 양상으로 변하기 때문으로 판단된다.

5. 결론

파리협정의 체결 이후 지구온난화의 방지를 위한 세계 각국의 노력이 경주되고 있는 현 시점에서 이산화탄소의 지중저장 기술의 개발은 시급한 상황이다. 본 연구에서는 이산화탄소 지중저장에 따르는 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위해 TOUGH2와 FLAC을 결합한 해석기법을 개발하여 이를 노르웨이에서 수행된 슬라이프너 프로젝트에 적용하였다. 본 연구에서는 FLAC3D-

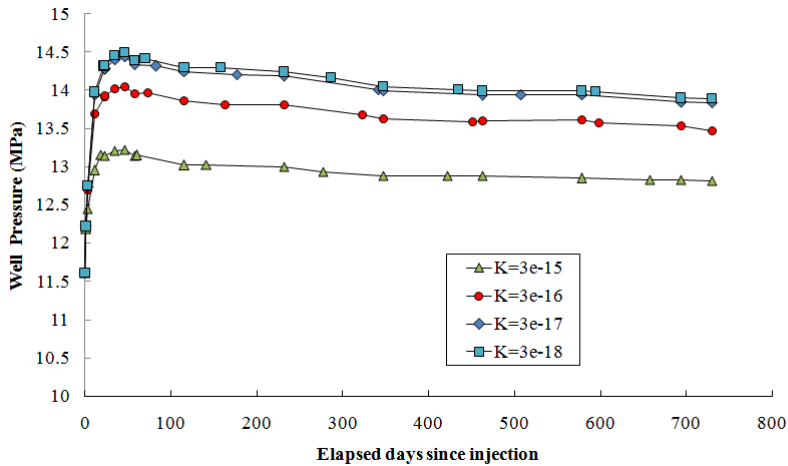


Fig. 16. Comparison of well pressure with time from the cases with different caprock permeabilities

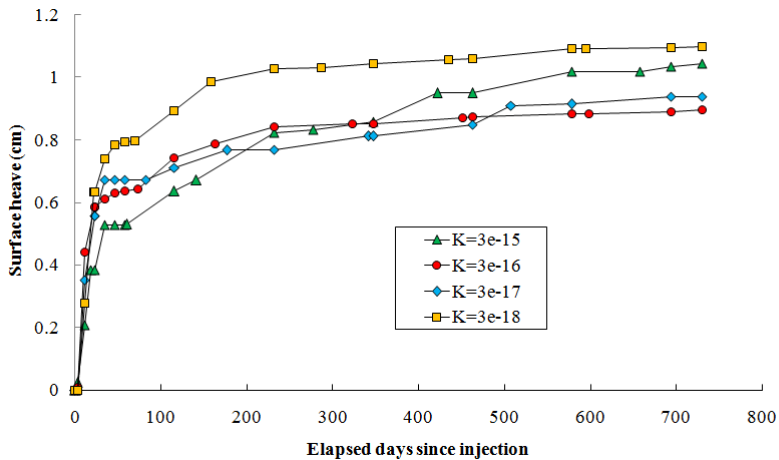


Fig. 17. Comparison of surface heave from the cases with different caprock permeabilities

TOUGH2 를 이용한 HM 해석 기법을 개발하고 이를 실제 이산화탄소 주입 프로젝트에 적용함으로써 해석 기법의 적용성을 평가하고자 하였다. 향후 실제 현장에서 측정된 결과와의 비교분석을 통한 검증의 사전 단계로 수행된 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주입 후 암반에서의 최대주응력은 주입초기에 빠르게 상승한 후 서서히 낮아지다가 안정된 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 최소주응력은 초기에 빠르게 증가한 후 주입전 초기값으로 복귀하는 경향을 보인다. 이는 응력의 발생이 지표면 방향으로의 변

위로 서서히 해소되기 때문으로 판단된다.

2. 주입공에서는 이산화탄소 주입 초기에 빠르게 증가하다가 46일 경과 후, 최대 14.5 MPa 정도의 압력이 발생한 후 시간에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다. 투수성이 낮은 세일층의 영향으로 압력의 변화 양상이 위치에 따라 약간의 차이를 보임을 알 수 있다.
3. 주입 초기에는 가스포화도도 낮고 변화하는 구간의 폭도 비교적 적지만 시간이 경과함에 따라 변화구간의 범위도 넓게 나타났다. 주입 후 시간의 경과함에 따라 상부 세일층의 영향이 뚜렷이 나타나며 이로 인해 가스포화도는 불규칙한 양상을 보였다.

4. 상부 지표에서의 수직변위는 시간에 따라 증가하며 주입 후 2년이 경과한 시점에서 최대 15 mm의 수직 변위가 발생하였다. 수평변위는 수직변위에 비해 낮게 나타나며 주입 초기에 최댓값에 도달한 이후 서서히 감소하는 경향을 보였다.
5. 일정한 주입속도로 해석을 실시한 결과, 주입공에서의 압력이 최댓값에 도달한 이후 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 이산화탄소의 주입속도를 일정하게 유지하기 위해서는 주입 초기에는 주입압력이 빠르게 증가하다가 일정 시간이 경과한 후에는 주입압력을 서서히 감소시켜야함을 의미한다.
6. 덮개암의 투수계수에 따른 수리-역학적 거동 변화를 파악하기 위해 투수계수를 $3e-15 \text{ m}^2 \sim 3e-18 \text{ m}^2$ 까지 변화시키면서 해석을 실시한 결과, 주입공에서의 압력은 덮개암의 투수계수에 반비례하였다.
7. 이산화탄소 주입 초기 지표면 변위는 덮개암의 투수계수에 반비례하는 것으로 나타나지만 시간이 경과하면서 이산화탄소의 수직 및 수평방향으로의 이동과 이에 따른 암반에서의 공극압, 응력 변화로 인해 지표면 변위의 순서가 바뀌는 것으로 나타났다.

지하공간의 개발 및 다양한 목적으로의 활용을 위해서는 지열, 지압, 지하수, 지화학적 영향을 고려한 암반의 장기 거동을 예측하는 것이 필수적이다. 본 연구에서 개발된 THM 복합거동 해석 기술개발은 이산화탄소 지중저장 뿐 아니라 지열개발, 세일가스, 오일샌드, 가스하이드레이트, coal bed methane 개발, 방사성폐기물 처분장, 고심도 지하공간개발, 지하자원개발, 압축공기 지중저장, 지중에너지저장 등 장,단기 미래에 예상되는 대규모 사업에도 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본연구사업임(과제번호 : 54813-01).

References

1. 권상기, 이창수, 박승훈, 2015, Decovalex-2015 Task B2를 위한 THM 해석기법 개발 및 적용, 터널과 지하공간, Vol. 25, No. 6, pp. 556-567.
2. 권이균, 2016, 이산화탄소 지중저장 사업의 추진현황 검토 및 한국의 추진방향 제안, KEPSCO journal on electric power and energy, Vol. 2, pp. 167-185.
3. 김형목, 박의섭, 신중호, 박용찬, 2008, 온실가스(CO₂) 지중저장과 암반공학기술요소, 터널과 지하공간, 18권, 3호, pp. 175-184.
4. 김현우, 천대성, 최병희, 최현수, 박의섭, 2013, CO₂ 지중저장 시 단층 안정성 평가, 터널과 지하공간, 23권, 1호, pp. 13-30.
5. 박상도, 2009, 이산화탄소 포집 및 저장기술, 물리학과 첨단기술, 2009년 6월호.
6. 윤태섭, 정연종, 강동훈, 2016, 이산화탄소 지중저장 연구개발 현황, The magazine of the Korean Society of Civil Engineers, 64권, 1호.
7. 환경부, 2016, 교토의정서 이후 신 기구체계 파리협정 길잡이.
8. Addis, M. A., 1997, The stress-depletion response of reservoirs, SPE annual technical conference and exhibition, SPE38720, San Antonio, Texas, 5-8 October.
9. Alnes, H., Eiken, O., Nooner, S., Sasagawa, G., Stenvold, T., Zumberge, M., 2011, Results from Sleipner gravity monitoring: updated density and temperature distribution of the CO₂ plume, Energy Procedia, Vol. 4, pp. 5504-5511.
10. Altmann, J.B., et al., 2010, Poroelastic effects in reservoir stress path, Int.J.of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 47, pp. 110-1113.
11. Altman, J. B., 2010, Poroelastic effects in reservoir modelling, Ph.D.Thesis.
12. Carroll, K. C., Nguyen, B. N., Fang, Y., Richmond, M. C., Murray, C. J., 2011, Coupling of STOMP and ABAQUS for Hydro-Geomechanical Modeling of Fluid Flow and Rock Deformation Associated with Subsurface CO₂ Injection, American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract #H51G-1271.
13. Engelder, T. and Fisher, M. P., 1994, Influence of poroelastic behavior on the magnitude of minimum horizontal stress, Sh, in overpressured parts of sedimentary basin, Geology, Vol. 22, pp.949-952.
14. Herwanger, J. and Horne, S. 2005, Linking geomechanics and seismics: Stress effects on time-lapse multi-component seismic data, 67th Annual international meeting, EAGE, Expanded Abstracts.
15. IPCC, 2001, Climate Change 2001: the Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
16. Johnson, J. W., Nitao, J. J., Steefel, C. I., Knauss, K. G., 2001, Reactive transport modeling of geologic CO₂ sequestration in saline aquifers: the influence of intra-aquifer shales and the relative effectiveness of structural, solubility, and mineral trapping during prograde and retrograde sequestration, Lawrence Livermore National Laboratory report, UCRL-JC-146932.
17. Loschetter, F. Smay, S. Sy, A. Burnol, A. Leynet, S. Lafortune and A. Thoraval, 2012, Simulatio of CO₂ storage in coal seams: Coupling of TOUGH2 with the solver for mechanics CODE-ASTER®, Proceedings, TOUGU symposium 2012.
18. Pruss, K., 2011, ECO2M: A TOUGH2 fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO₂, including super-and sub-critical conditions, and phase change

- between liquid and gaseous CO₂, Contact No: LBNL-4590E, LBNL, Berkeley, CA.
19. Pruss, K., Oldenburg, C., Moridis, G., 1999, TOUGH2 user's guide, version 2.0, Earth science division, LBNL, Univ. of California.
 20. Rutqvist J., Vasco, D. W., Myer, L., 2010, Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah Algeria, Int.J.of Greenhouse Gas Control, Vol. 4, pp. 225-30.
 21. Sayers, C. M., 2006, Sensitivity of time-lapse seismic to reservoir stress path, Geophysical prospecting, Vol. 54, pp. 369-380.
 22. Sen, V. and Settari, A. T., 2005, Couple geomechanical and flow modeling of compacting reservoirs, The leading edge, Vol. 24, pp. 1284-1286.
 23. Torp, T. A., Gale, J., 2004, Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects, Energy, Vol. 29, pp. 1361-1369.
 24. Vasco, D. W., Ferretti, A., Novali, F., 2008, Reservoir monitoring and characterization using satellite geodetic data: Interferometric synthetic aperture radar observations from the Krechba field, Algeria, Geophysics Vol. 73, WA113-122.



권상기

1987년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사
 1996년 University of Missouri-Rolla,
 Mining Eng. 공학박사

Tel: 032-860-7554
 E-mail: kwonsk@inha.ac.kr
 현재 인하대학교 에너지자원공학과
 부교수



이혜지

2014년 인하대학교 에너지자원공학과
 공학사

Tel: 032-872-7551
 E-mail: hoom915@naver.com
 현재 인하대학교 공과대학 에너지자원
 공학과 석사과정