

## 국내 이산화탄소 지중격리저장 실증실험 후보부지의 역학적 안정성 평가 기초해석

김아람, 김형목\*, 김현우, 신영재

### Geomechanical Stability Analysis of Potential Site for Domestic Pilot CCS Project

A-Ram Kim, Hyung-Mok Kim\*, Hyun-Woo Kim, Young-Jae Shinn

**Abstract** For a successful performance of Carbon Capture Sequestration (CCS) projects, appropriate injection conditions should be designed to be optimized for site specific geological conditions. In this study, we built a simple 2-dimensional analysis model, based on the geology of Jang-gi basin which is one of the potential sites of domestic CCS projects. We evaluated the impact of initial stress conditions and injection rate through coupled TOUGH-FLAC simulator. From the preliminary analysis, we constructed risk scenarios with the higher potential of shear slip and performed scenario analysis. Our analysis showed that normal stress regime produced the highest potential of shear slip and stepwise increasing injection rate scenario resulted in much larger pore pressure build up and consequent higher potential of the shear slip, which was evaluated using a mobilized friction coefficient.

**Key words** CCS (Carbon Capture and Sequestration), Initial stress conditions, Potential of shear slip, Mobilized friction coefficient, Risk scenario analysis

**초 록** 이산화탄소 지중저장 사업의 성공적인 수행을 위해서는 저장시스템의 안정성을 확보할 수 있는 대상 지층을 선정하고 현장 지질조건에 최적화된 주입 조건을 설계해야 한다. 본 연구에서는 국내 실증실험 대상 예상후보지의 하나인 장기분지의 지질구조를 바탕으로 2차원 간략해석모델을 구축하고 TOUGH-FLAC 연계해석기법을 사용하여 초기응력조건과 주입량이 이산화탄소 격리저장시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 기초해석 결과, 수직응력이 수평응력보다 우세한 정단층 응력조건에서 전단미끄러짐 가능성이 가장 높은 결과를 보였으며, 단위시간당 주입량을 달리하는 주입량 시나리오 해석에서는 주입량을 단계적으로 증가시켜 주입하는 경우가 공극압의 증가폭이 가장 크고 활동마찰계수를 이용한 전단미끄러짐 가능성 평가 결과에서도 가장 불리한 것으로 평가되었다.

**핵심어** 이산화탄소 지중저장, 초기응력조건, 전단미끄러짐 발생가능성, 활동마찰계수, 위험시나리오 해석

## 1. 서 론

이산화탄소 포집 및 저장기술은 이산화탄소를 대량발

Received: Apr. 7, 2017

Revised: Apr. 26, 2017

Accepted: Apr. 26, 2017

\*Corresponding Author: Hyung-Mok Kim

Tel) +82234084387, Fax) +82234084344

E-Mail) hmkim@sejong.ac.kr

Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University,  
Seoul 143-747 Korea

생원으로부터 포집한 후 압축 및 수송 과정을 거쳐 육상 또는 해양 지중에 안전하게 저장하거나 유용물질로 전환하는 일련의 과정을 포함하는 기술을 의미한다. 현재 국내에서는 1만 톤급 이산화탄소 지중저장을 통한 한반도 이산화탄소 지중저장 검증 및 핵심기술 확보를 목표로 Korea CCS 2020 사업(<http://www.kcrc.re.kr/>)이 수행중에 있으며 이를 통해 관련 기초 연구도 꾸준히 수행되어 왔다.

이산화탄소 지중저장과 관련한 암반공학기술요소는 국내외의 이산화탄소 지중저장 기술 현황 파악과 압

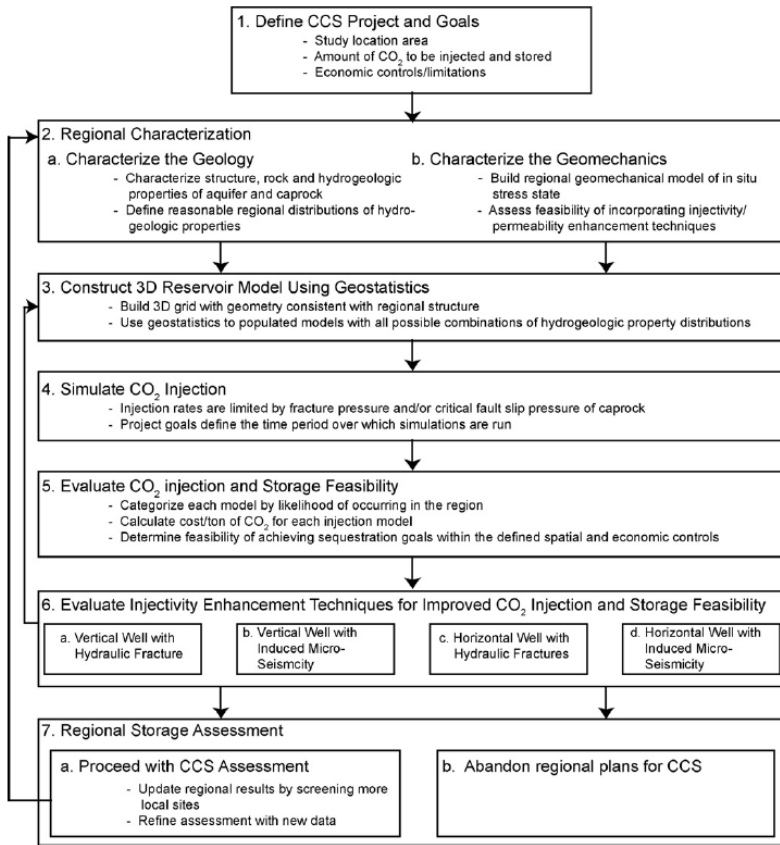


Fig. 1. Flow chart of feasibility assessment for CCS projects (Lucier and Zoback, 2008)

반공학적 해결과제 등의 분석연구(Kim et al., 2008, Chae et al., 2010, 박의섭 외, 2012)를 시작으로 이산화탄소 지중저장 시 단층의 안정성 평가와 이산화탄소 누출 가능성의 평가연구 동향 및 방법에 대한 사례연구(Kim et al., 2013)와 주입온도 및 주입량 시나리오 해석을 통해 이산화탄소 저장시스템의 안정성 평가를 수행한 연구(Kim et al., 2016, Kim, 2017)등이 보고된 바 있다. 또한, 이산화탄소의 처분에 추가하여 초기 경제성 확보 목적의 활용을 포함한 CCUS(Carbon Capture Utilization and Sequestration) 개념의 등장으로 이산화탄소 지중저장과 원유회수증진(Enhanced Oil Recovery, EOR)을 연계한 사례(Kim et al., 2014)연구도 최근 주목을 받고 있다.

Lucier & Zoback(2008)은 이산화탄소 지중저장 프로젝트의 타당성 평가를 수행하기 위한 일련의 과정들을 Fig. 1과 같이 도식화하여 제안한 바 있다. 먼저 프로젝트를 수행할 위치 선정과 주입 목표 및 계획을 수립하는 것을 필두로 주입 목표가 설정된 이후에는 주입

대상 대수층에 대하여 현장 지질조건 및 지층구조 및 물성값의 불균질성과 불확실성에 대한 특성화 연구를 바탕으로 이산화탄소 주입압과 주입량 등 주입 조건을 최적화한다. 최적화 과정에서는 물리탐사, 지질학 및 지구통계학 등으로부터 획득한 자료를 바탕으로 3차원 저류층 모델을 구축하고 이산화탄소 주입에 따른 공극압의 증가, 단층의 미끄러짐 가능성 평가, 덮개암의 안정성 평가 등의 결과를 바탕으로 주입압을 설정하고 지중저장 프로젝트의 목표 주입기간의 재설정 및 저장 효율성 등을 평가하는 단계로 진행됨을 알 수 있다.

현재 국내에서도 이와 유사한 과정으로 이산화탄소 지중저장사업의 성공적 수행을 위해 관련 기관을 중심으로 사업의 필요성 및 사업의 기술적 타당성 분석이 수행되었다(권이균 외, 2012). 이러한 타당성 분석 결과에 기초하여 후보 부지 중 하나인 포항 장기분지를 대상으로 지구물리탐사, 탐사시추, 지표지질조사, 시추공 코어 분석, 물리검층, 지질 및 지층구조와 물성 모델링

등의 연구 결과를 종합한 부지 특성화 연구가 수행 중에 있다(한국지질자원연구원, 2016). 본 연구는 포항 장기분지 실증실험 부지를 대상으로 한 2차원 해석모델을 구축하여 주입조건의 최적화를 위한 기초해석을 실시하고 현장 지질조건의 불확실성 및 주입 계획에 대한 시나리오 해석을 수행하는 내용으로 Fig. 1에 제시된 6 단계의 주입성 예측과 주입효율 향상방안 도출을 위한 단계의 기초해석에 해당한다고 할 수 있다.

CCS 사업의 계획 단계에서 주입압력을 결정하고, 저장층과 덮개암의 안정성 평가를 수행하기 위해서는 저류층 및 덮개암 구간의 초기응력조건에 대한 정보가 필수적으로 요구된다. 현장 초기응력 분포는 격리저장시스템의 역학적 안정성뿐만 아니라 주변 단층의 재활성화에 막대한 영향을 미치는 중요 인자로 보고되고 있다(Hawkes et al., 2005; Cappa & Rutqvist., 2011; Mazzoldi et al., 2012). 현재 국내 실증실험 대상 부지에서도 주입지점 심도에서의 초기응력 정보를 획득하기 위한 수압파쇄 시험이 수행중에 있으나 수 백미터 이상의 대심도에서의 기술적 난제로 인해 주입 대상 지층에서의 초기응력 조건이 명확히 규명되지는 못하였다. 또한, Kim et al., (2016)에 의하면 단위시간 당 주입량 변화에 따라 저장시스템의 안정성이 달라질 수 있으므로 저장시스템의 안정성을 확보할 수 있는 대상 지층을 선정한 이후에는 현장 지질조건에 최적화된 주입 조건을 설계해야 할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 국내 실증실험 대상 후보부지의 현장 지질구조를 바탕으로 구축된 해석모델을 이용하여 1차 목표 주입량으로 설정된 총 1만톤의 이산화탄소 주입계획에 대한 3가지 주입량 시나리오를 설정하고 격

리저장시스템의 안정성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 해석에는 다양한 유사프로젝트에의 적용 실적이 있는 TOUGH-FLAC 연계해석(Rutqvist, 2011)을 사용하였으며, 격리저장시스템의 역학적 안정성은 활동마찰계수(Mobilized friction coefficient)와 모어응력원(Mohr's circle)을 이용하여 평가하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 TOUGH2/ECO2N-FLAC3D 연계해석

본 해석에서는 이산화탄소 주입에 따른 열-수리-역학적 연계거동 해석을 위해 TOUGH-FLAC 연계해석 시뮬레이터를 사용하였다. TOUGH-FLAC 연계해석기법은 다공질 암반 내 유체 유동 및 열전달을 모사하는 TOUGH2(Pruess et al., 1999) 시뮬레이터와 유체 주입에 의한 암반 내 유효응력 및 역학적 변형을 모사하는 FLAC3D(Itasca Consulting Group, 2012)프로그램을 순차적으로 반복 해석하는 기술이다(Rutqvist, 2011). TOUGH2에서 계산된 온도, 압력, 포화도 값과 같은 열-수리적 해석결과를 FLAC3D 내의 FISH 함수를 이용해 구축된 연계모듈을 통해 역학적 거동평가를 위한 응력-변형률을 계산한다. ECO2N 모듈은 물-이산화탄소-NaCl 성분의 거동 분석을 위한 TOUGH2의 상태방정식(Equation Of State) 중 하나로 10°C에서 110°C이하의 온도구간과 60 MPa 이하의 유체압력 범위의 CCS사업에 적용되어 왔으나 주입 이산화탄소의 기체-액체 상변화와 같은 복잡 거동을 고려하기 위해서는 ECO2M 모듈(Pruess et al., 2011)을 사용할 수 있다.

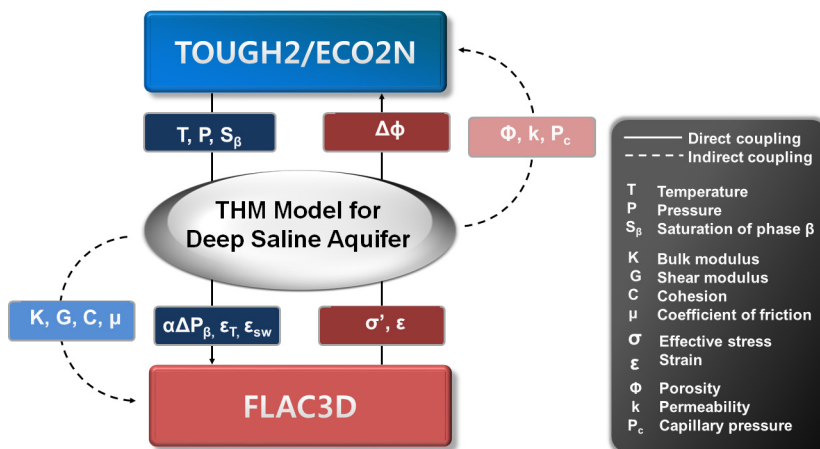


Fig. 2. Structures of coupled TOUGH2 and FLAC3D analysis

2.2 전단미끄러짐 가능성 평가

이산화탄소 주입에 따른 공극압력의 증가와 유효응력의 감소로 발생하는 기존균열의 전단미끄러짐 발생가능성은 활동마찰계수와 모어응력원을 통해 평가하였다. 전단미끄러짐 발생 조건으로는 식 (1)과 같은 모어쿨롱 (Mohr-Coulomb) 기준식을 사용하였다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

여기서,  $c$  : 점착력,  $\phi$  : 기존균열의 마찰각이다.

암반 내부에는 임의의 방향의 균열이 존재하고 현재 응력 상태에서 가장 취약한 방향의 균열에서 전단미끄러짐이 발생하는 것으로 가정하였으며 이들 균열의 마찰각은 25°, 점착력은 없는 것으로 설정하였다. 따라서, 전단미끄러짐 발생 가능성을 설명하는 활동마찰계수는 단층에 작용하는 전단응력과 수직응력의 함수로 식 (2)와 같이 계산된다. 주입에 따른 유효응력 변화로 기존 균열 및 주변 단층의 전단미끄러짐 가능성의 증가는 활동마찰계수의 증가로 표현되며 이 값이 초기마찰계수

와 같아질 때 전단미끄러짐이 발생함을 의미한다.

$$\mu = \tan(\phi_{mob}) = \frac{\tau}{\sigma'_n} \quad (2)$$

여기서,  $\tau$  : 전단응력,  $\sigma'_n$  : 수직응력이다.

3. 해석개요

3.1 해석 대상부지의 지질구조 및 특성

해석대상 부지인 포항 장기분지는 한반도 남동부에서 가장 큰 전기 마이오세 퇴적분지로 올리고세 말 ~ 마이오세 동안 동해의 확장과 관련되어 형성된 것으로 알려졌다. 주로 전기 마이오세의 데사이트질(dacitic) 내지 현무암질 화산암류와 하성 내지 호성 퇴적물로 충전되어 있으며, 분지의 내부는 구룡포, 오천, 뇌성산, 염암리 지괴 그리고 양포소분지로 구분되는데(Fig. 3), 이 중 뇌성산 지괴는 다른 지괴보다 기반암 심도가 깊고 지중저장이 가능한 층서 발달이 용이한 것으로 예상되어 육상 1만 톤급 이산화탄소 지중저장소로서 유리한 지질조

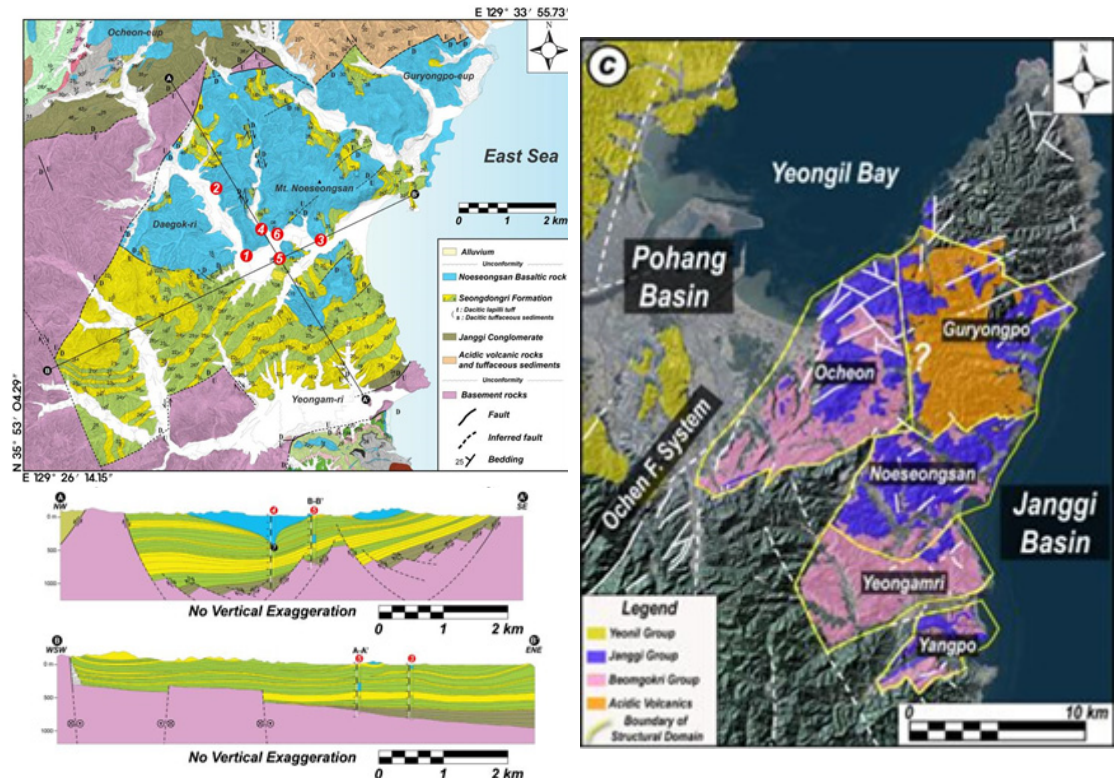


Fig. 3. Geological map and sectional view of Jang-gi basin (한국지질자원연구원, 2016)

건을 갖추고 있어 적절한 후보지로 보고된바 있다(김민철 외, 2015). 시추조사와 물리검층 등 부지 특성화 연구 결과, 장기-6호 시추공 지역의 저장층의 심도는 940 ~ 975 m이며 그 위로 40 m 두께의 덮개층이 존재하는 것으로 확인되었으며 장기역암층 내에 협재하는 두꺼운 역암층이 구조적으로 이산화탄소 지중저장이 가능한 심도, 두께 및 연속성을 보인다는 결과를 획득하였다. 따라서 장기분지에서 수행될 실증실험의 유력한 주입 부지는 장기-4, 장기-6 시추공 인근 지역으로 심부(900 m 이상)에 분포하는 장기역암층이 저장층으로 적합하며, 온도검층 결과 저장층의 온도는 심도 900 m 지점에서 49°C의 값을 보여 초임계상태의 이산화탄소를 유지하며 주입하기에 충분한 온도임을 확인하였다(한국지질자원연구원, 2016).

**3.2 해석 모델 및 조건**

본 연구에서는 국내 이산화탄소 격리저장 프로젝트 대상 부지의 현장 지층구조를 바탕으로 해석모델을 구축하고 해당 사업목표로 설정된 이산화탄소를 2년간 총 1만 톤을 주입하는 것을 모사하였다. 해석을 수행하는데 사용한 해석 모델은 Fig. 4와 같으며, 기 구축된 3차원 해석 모델의 주입지점을 포함하고 단층면의 주향에 수직한 2차원 단면을 대상으로 해석을 수행하였다. 2차원 해석모델의 가로 길이는 측면경계효과가 발생하지 않도록 10,000 m로 설정하였으며 세로길이는 지표면으로부터 1,700 m 심도까지로 하였다. 해석 모델의 저류층 상부암은 현무암질 응회암층(Basaltic tuff), 덮개암은 데사이트질 응회암층(Dacitic tuff), 주입저류층은 장기역암층(Conglomerate)으로 데사이트질 응회암층과 장기역암층이 반복되는 다층구조(multi-layer)로 되어 있다. 덮개암과 주입저류층의 두께는 각각 70 m 및 200 m로 약 14°의 경사를 갖고 있다. 지표면의 초기 온도는

12.5°C로 설정하였으며 압력은 대기압(= 0.1 MPa)에 해당한다. 압력은 정수압 상태를 가정하였고, 온도 구배는 온도검층 결과에 따라 44°C/km로 설정하였다. 이산화탄소의 주입 위치는 심도 1,056 m 지점으로 주입 지점의 초기 온도는 59°C, 압력은 10.4 MPa 이다. 주입 지점 (x= 1,088 m)으로부터 가로방향으로 왼쪽 약 200 m 거리에는 70°의 고각도의 단층이 존재하고 있으며, 단층대 해석을 위해 단층대는 코어와 파쇄대가 존재하는 혼재된 투과-차폐구조(combined conduit-barrier)로 가정하였으며, 코어와 파쇄대의 폭은 각각 5 m로 설정하였다. 해석모델의 하부경계는 일정온도조건에 해당하고, 역학 해석에서 우측 경계는 일정응력조건, 상부경계는 자유 변형조건을 사용하였다.

장기-1 공 시추코어에 대한 암반분류 및 실내시험 결과를 토대로 각 지층별 역학적 물성을 산정하여 적용하였다(Table 1). 단층대의 역학적 거동은 Mohr-Coulomb 모델에서 연약면 방향으로 발달해있는 균열의 존재를 통해 이방성(anisotropic)의 특징을 갖는 단층대의 역학적 거동을 모사하는 ubiquitous joint model을 사용하여 모사하였다. 마찰각(friction angle)은 25°, 팽창각(dilation angle)은 20°로 가정하였다. 장기분지 단층의 수리학적 및 역학적 특성에 대한 조사 결과는 극히 제한적인 관계로 Cappa & Rutqvist (2011)의 연구에서 사용된 단층의 제반 물성값(Table 2)을 사용하였다.

**4. 해석결과**

TOUGH-FLAC 연계해석의 장점은 주입 이산화탄소의 유동 양상과 주입층 내 공극압력 변화에 기인한 응력거동을 동시에 파악할 수 있다는 것이다. Fig. 5는 주입 이산화탄소의 유동 양상을 나타낸 것으로 주입 개시 약 1년 후 주변 단층에 도달하는 결과를 보였다. 본 연

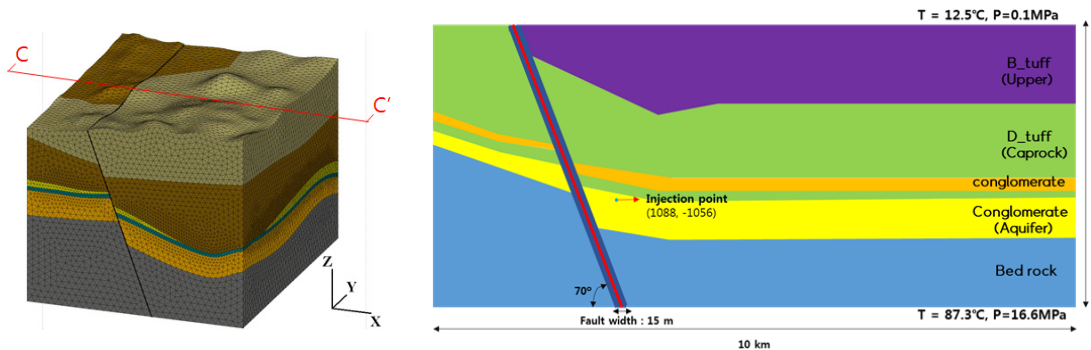


Fig. 4. Analysis model and prescribed conditions on the cutting plane of C-C'

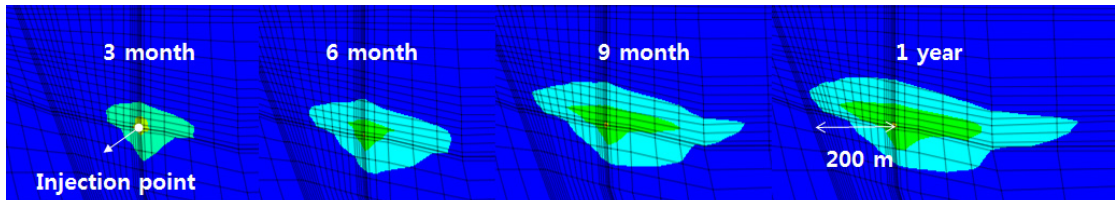


**Table 1.** Material properties used in the analysis

	B_tuff (Upper)	D_tuff (Caprock)	Conglomerate (Aquifer)	Bedrock	Fault
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2250	2250	2280	2440	2260
Porosity (-)	0.1	0.05	0.15	0.01	0.1
Permeability (m <sup>2</sup> )	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-20</sup>
Friction angle (°)	-	-	-	-	25
Dilation angle (°)	-	-	-	-	20
Young's modulus (GPa)	9.0	8.1	3.8	30	5.0
Poisson's ratio (-)	0.14	0.19	0.24	0.13	0.25
Biot coefficient (-)	1	1	1	1	1
Corey's Residual gas saturation	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Corey's residual liquid saturation	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
van Genuchten (1980), p0 (kPa)	19.9	19.9	19.9	19.9	19.9
van Genuchten (1980), m (-)	0.457	0.457	0.457	0.457	0.457

**Table 2.** Fault properties used in the analysis

	Normal stiffness	Shear stiffness	Friction angle	Dilation angle	Cohesion
Fault	5.0 GPa	5.0 GPa	25°	20°	0 MPa



**Fig. 5.** Simulated CO<sub>2</sub> migration during injection period of 1 year

구에서는 저장시스템의 역학적 안정성 평가에 주안점을 두고 초기응력조건 및 주입량 시나리오가 미치는 영향을 중점적으로 평가하였다.

**4.1 초기응력조건의 영향**

초기응력조건으로는 수직응력이 수평응력보다 큰 정단층(normal fault) 응력조건(K=0.7)과 수직응력과 수평응력이 동일한 등방(isotropic) 응력조건(K=1.0), 수평응력이 수직응력보다 큰 역단층(reverse fault) 응력조건(K=1.3)을 고려하였다. 본 해석은 단층면의 주향에 수직인 2차원 평면모델에 대하여 해석을 수행하였기 때문에, 주향-이동단층(strike-slip fault) 조건은 고려되지 않았다.

정단층, 등방, 역단층 응력조건하에서 주입 후 시간 경과에 따라 저류층과 교차하는 단층대 상부에서의 모어 응력원(Mohr's stress circle)을 Fig. 6부터 Fig. 8에

도시하였다. 정단층 응력조건에서는 수평방향이 최소주응력이고 수직방향이 최대주응력이므로 응력원의 직경이 감소하며 전단미끄러짐이 발생하는 방향으로 이동하는 양상을 보였다(Fig. 6). 역단층 응력조건에서는 수평방향이 최대주응력이고 수직방향이 최소주응력이므로 응력원의 직경이 증가하는 결과를 보였다(Fig. 8). 이는 이산화탄소 주입에 따른 유효응력 변화양상이 방향에 따라 상이하기 때문으로 수직방향은 상부의 자유변형조건으로 인해 수평방향에 비해 유효응력의 변화량이 상대적으로 크기 때문에 발생하는 결과이다. 등방 응력조건의 주입 전 초기응력상태는 수평 및 수직방향 주응력 크기가 같으므로 점으로 표시된다(Fig. 7). 모든 응력조건에서 주입 개시 1년 후 응력원이 전단파괴기준선을 넘어서는 결과를 보였으나 이는 특정지점에서의 전단미끄러짐 가능성을 나타낸 것으로 저장시스템의 전반적 위험성을 의미하지는 않는다. 또한, 역단층 응력

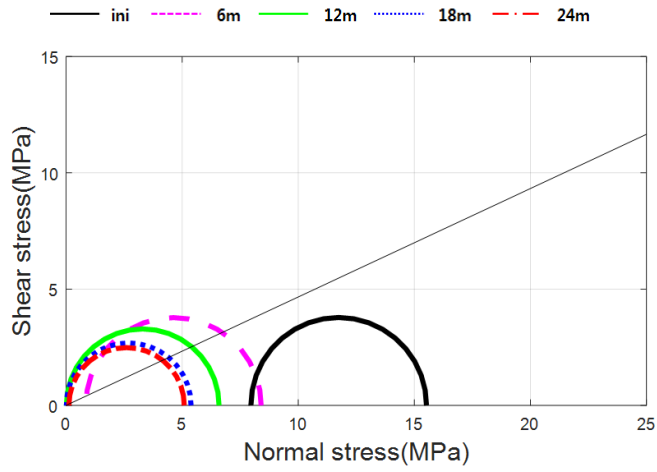


Fig. 6. Stress evolution at the top of the fault zone under normal faulting stress regime ( $K=0.7$ )

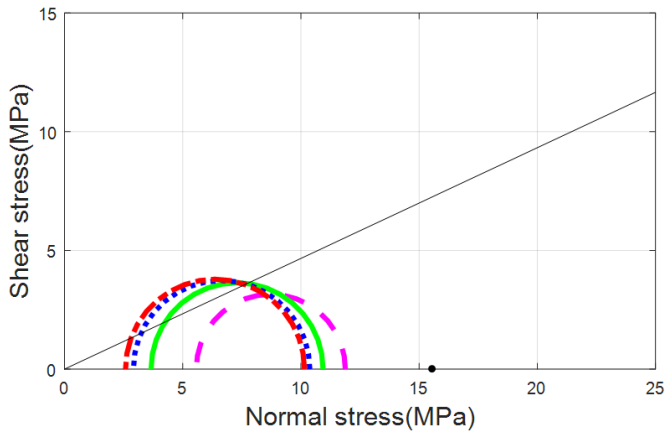


Fig. 7. Stress evolution at the top of the fault zone under isotropic stress regime ( $K=1.0$ )

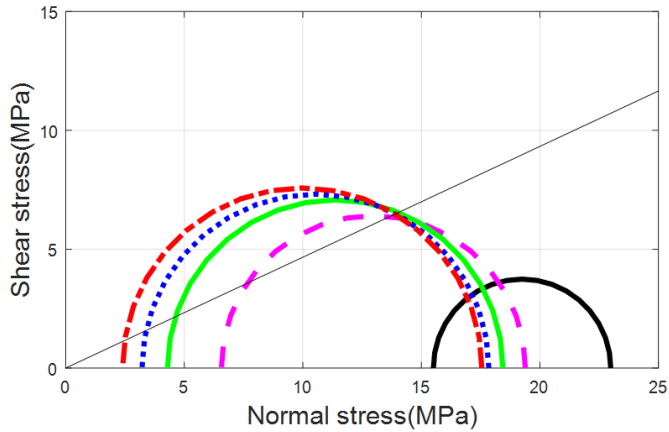


Fig. 8. Stress evolution at the top of the fault zone under reverse faulting stress regime ( $K=1.3$ )

**Table 3.** Injection scenarios with different injection rates

	Case 1	Case 2	Case 3
Type	Step-wise Increasing Injection	Step-wise Decreasing Injection	Continuous Injection
Injection rate (kg/s)	0.0636/0.1272/0.1908/0.2544	0.2544/0.1908/0.1272/0.0636	0.198
Injection period	2 years		
Total injection rate	10,000 ton		
Initial stress condition	Isotropic (K=1)		

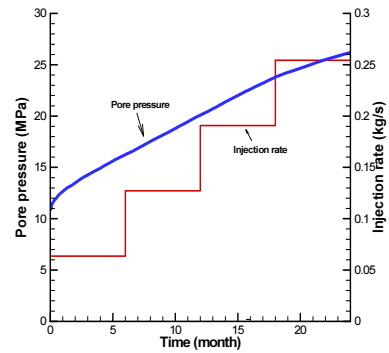
조건에서의 전단미끄러짐은 최대주응력 방향인 수평응력과 지각도를 이루는 수평방향(sub-horizontal)균열에서 발생하기 때문에 지표면으로 누출 가능성은 크지 않은 것으로 알려져 있다(Rutqvist et al., 2008).

급경사의 단층을 고려한 본 해석모델에서 지표면으로 누출 관점에서 가장 위험한 조건은 정단층 응력조건으로 평가할 수 있다. 다만, 단층의 재활성에 기인한 주입 이산화탄소의 누출 가능성 평가를 위해서는 전단미끄러짐에 수반하는 단층 투과특성의 활성화를 고려한 해석이 추가적으로 수행되어야 한다. 단층 투과특성의 변화를 고려할 경우 단층면을 따른 공극압력의 분포 등이 달라지기 때문에 전단미끄러짐에 대한 평가 결과도 달라질 수 있다.

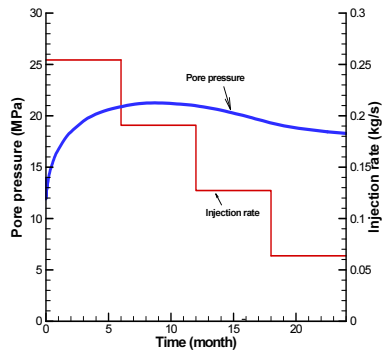
**4.2 주입량 시나리오 해석**

이산화탄소 주입량은 한국지질자원연구원(2016)의 현장 실증시험 주입계획에 따라 총 1만 톤을 주입하는 것으로 설정하였다. 시나리오 해석에서는 주입 총량은 동일하게 유지하면서 단위시간당 주입량을 변화시켜 해석을 진행하였다. Table 3은 각각의 주입시나리오를 요약한 것으로 총 2년간의 누적 총 주입량은 1만 톤으로 동일하나, 단위시간당 주입량을 단계별로 증가하는 경우(Case 1), 단계적으로 감소시켜 주입하는 경우(Case 2) 및 일정한 주입량을 유지하며 주입하는 경우(Case 3)로 구성하였다. 이산화탄소 주입은 모두 등온주입 조건으로 가정하였으며 등방응력조건 하에서 해석을 수행하였다. 단위시간당 주입량을 달리하는 주입시나리오 해석에 따른 단위시간당 주입량 변화와 주입 지점에서의 공극압력 증가 해석결과를 Fig. 9에 함께 도시하였다.

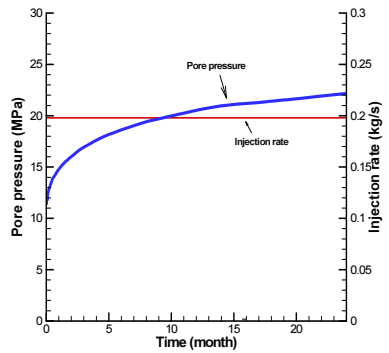
주입량을 단계적으로 증가시켜 주입하는 Case 1의 경우, 주입량 증가에 따라 공극압력이 지속적으로 증가하여 주입 2년 후 최종 공극압력은 26.19 MPa로 나머지 시나리오에 비해 공극압력이 가장 높은 결과를 보였다. Case 2는 주입량을 단계적으로 감소하여 주입하는 시나리오로 주입초기 증가했던 공극압력 값은 주입 8개월 후 21.26 MPa로 최대값을 보인 이후 점진적으로 감



(a) Case 1 ( $P_{max} = 26.19$  MPa)



(b) Case 2 ( $P_{max} = 21.26$  MPa)



(c) Case 3 ( $P_{max} = 22.17$  MPa)

**Fig. 9.** Injection rate (red line) and pore pressure build-up (blue line) of different injection scenarios



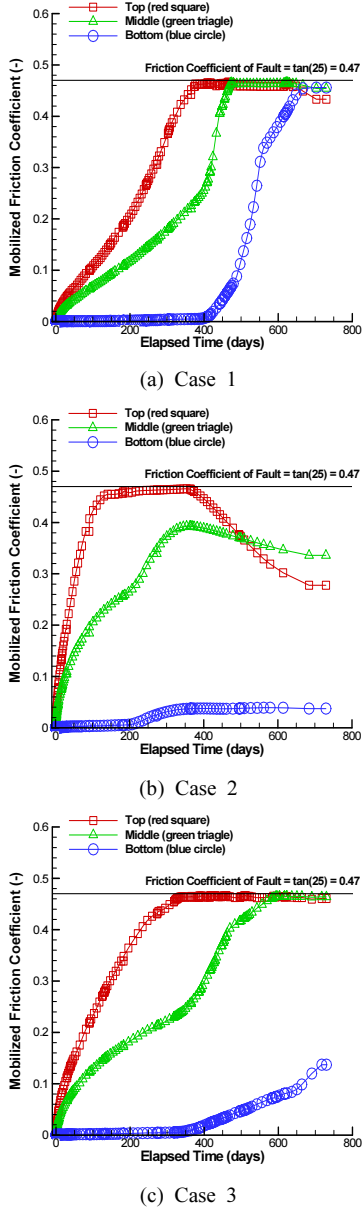


Fig. 10. Mobilized friction coefficients for different injection scenarios

소하는 결과를 보인다. 일정한 주입량을 연속적으로 주입하는 Case 3의 경우, 공극압력은 주입이 진행됨에 따라 지속적으로 증가하며 주입 2년 후 공극압력 값은 22.17 MPa의 결과를 보였다. 이산화탄소 주입에 따른 공극압력 변화양상은 저장시스템 안정성 평가를 위한 일차적인 지표로 활용될 수 있으며 과도한 공극압력의

증가는 유효응력의 감소로 인해 저장시스템의 역학적 안정성을 위협할 수 있다(Streit et al., 2004). 따라서 단위시간당 주입량을 달리 설정한 주입량 시나리오 해석 결과로부터 주입량을 단계적으로 감소시켜 주입을 수행하는 Case 2가 공극압의 증가폭이 가장 낮게 예측되어 주입량 설계 관점에서 가장 유리한 주입방식이라 할 수 있다. 다만, 유의할 점은 본 주입량 해석결과에는 주입압에 의한 공극구조 변형과 이에 따른 투과특성의 변화가 고려되지 않았기 때문에 이러한 유동-역학 양방향 연계저동을 포함한 해석이 향후 추가수행되어야 할 것이다.

Fig. 10은 각기 다른 주입량 시나리오에 대하여 활동마찰계수의 변화를 통해 주입층과 교차하는 단층대의 상부와 하부, 중간지점에서의 전단미끄러짐 가능성을 조사한 결과이다. 빨간색 네모표시는 단층대의 상부, 녹색 세모표시는 단층대의 중간지점, 파란색 동그라미표시는 단층대의 하부지점을 나타내고, 활동마찰계수가 단층면의 초기마찰계수와 같아지는 시점부터 전단미끄러짐이 발생함을 의미한다. Case 1에서는 주입 개시 약 1년 이후 모든 지점에서 단층의 미끄러짐이 발생하는 것으로 나타났으며, 일정주입조건을 모사한 Case 3에서는 단층의 상부와 중간지점에서 단층의 미끄러짐이 발생하는 것으로 평가되었다. Case 2는 상대적으로 낮은 공극압력의 증가로 활동마찰계수를 이용한 단층대의 미끄러짐 가능성평가에서도 공극압력 변화양상에서 예측된 바와 같이 역학적으로 가장 안전한 것으로 평가되었다. 모든 경우에 있어 주입 이산화탄소의 부력에 의한 상승으로 단층면 상부에서의 공극압 증가 및 활성화 가능성이 높게 평가되고 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 국내 이산화탄소 지중저장 예상후보지 중 하나인 포항 장기분지를 대상으로 이산화탄소 주입에 따른 저장시스템의 역학적 안정성 평가에 관한 기초 연구를 수행하였다. 현지 초기응력분포의 불확실성의 영향과 단위시간당 주입량 변화에 따라 공극압력의 변화량 정도와 모어응력원과 활동마찰계수를 이용한 전단미끄러짐 가능성을 예측함으로써 역학적 안정성을 평가하였다.

초기응력조건에 따른 전단미끄러짐 가능성 평가 결과, 수직응력이 수평응력보다 크게 작용하는 정단층 응력조건에서 역학적으로 가장 불리한 결과를 보였고 저류층과 교차하는 단층면의 상부가 가장 취약함을 확인하였다. 단위시간당 주입량을 달리하는 주입량 시나리

오 해석에서는 주입량을 단계적으로 증가시켜 주입할 때 공극압의 증가폭이 가장 크고, 활동마찰계수를 이용한 전단미끄러짐 가능성 평가에서도 가장 위험한 것으로 평가되었다. 이들 결과는 향후 국내 CCS 사업의 본격적 추진과정에서의 저장시스템 주입성 평가 및 주입 효율 향상을 위한 상세평가 단계에 유익한 정보로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주입 이산화탄소의 누출 가능성 평가 및 저장시스템의 안정성 평가를 위한 상세 평가단계에서는 본 해석에서 고려되지 않은 기존 균열 및 주변 단층대의 전단미끄러짐 발생에 따른 공극률과 투과계수 변화가 반드시 포함되어야 할 것이다. 또한, 본 해석은 2차원 평면변형 모델 해석으로 단층면 주향 방향의 변위 및 유동이 구속되어 있어 주입 이산화탄소는 1차원 선형유동의 형태를 가지기 때문에 3차원 해석에 비해 공극압 증가 및 이산화탄소 유동, 활동마찰계수 등이 과대평가되는 경향이 있음(Vilarrasa et al., 2014; Rinaldi et al., 2015)을 주지해야 할 것이다.

## 사 사

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 2016년도 (재)한국이산화탄소포집 및 처리연구개발센터(Korea CCS 2020 사업, KCRC-2014M1A8A1049279)와 2017년도 한국연구재단(과제번호: NRF-2017R1A2B4002280)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

1. 권이균, 신영재, 김지환. (2012), CO<sub>2</sub> 지중저장사업 예비 타당성조사 지식경제부 사전심의를 위한 기획연구, 한국지질자원연구원
2. 김민철, 김용식, 손의영, 손문, 황인걸, 신영재, 최현수. (2015). 한반도 남동부 마이오세 장기분지 내 CO<sub>2</sub> 지중저장 가능성 평가를 위한 지질구조/퇴적학 연구. 지질학회지, 51(3), 253-271.
3. 박의섭, 김현우, 천대성, 최현수. (2012). CO<sub>2</sub> 지중저장의 암반공학적 해결과제, 2012 한국자원공학회 추계학술발표회 CCS 특별세션, pp. 84-96.
4. 한국지질자원연구원, 2016, 국내 육상 1만톤급 CO<sub>2</sub> 지중저장 실증 연구 연차보고서.
5. Cappa, F., & Rutqvist, J. (2011). Impact of CO<sub>2</sub> geological sequestration on the nucleation of earthquakes. Geophysical Research Letters, 38(17).
6. Chae, K. S., Lee, S. P., Yoon, S. W., & Matsuoka, T. (2010). Trends of Underground CO<sub>2</sub> Storage Technology for the Large Scale Reduction of GHG. TUNNEL AND UNDERGROUND SPACE, 20(5), 309-317.
7. Itasca Consulting Group Inc., 2012, FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) Version 5.0 (Minneapolis, MN).
8. Kim, A.R. (2017). Stability analysis of deep underground sequestration system of CO<sub>2</sub> under uncertain in-situ geologic conditions using hydro-mechanically coupled analysis, MSc thesis, Sejong University, Seoul, Korea.
9. Kim, A.R., & Kim, H.M.(2016). Scenario Analysis of Injection Temperature and Injection Rate for Assessing the Geomechanical Stability of CCS (Carbon Capture and Sequestration) System. TUNNEL AND UNDERGROUND SPACE, 26(1), 12-23.
10. Kim, H., Cheon, D. S., Choi, B. H., Choi, H. S., & Park, E. S. (2013). Case Study on Stability Assessment of Pre-existing Fault at CO<sub>2</sub> Geologic Storage. TUNNEL AND UNDERGROUND SPACE, 23(1), 13-30.
11. Kim, H. M., Park, E. S., Synn, J. H., & Park, Y. C. (2008). Greenhouse Gas (CO<sub>2</sub>) Geological Sequestration and Geomechanical Technology Component. TUNNEL AND UNDERGROUND SPACE, 18(3), 175-184.
12. Kim, H. M., & Bae, W. S. (2013). Enhanced Oil Recovery (EOR) Technology Coupled with Underground Carbon Dioxide Sequestration. TUNNEL AND UNDERGROUND SPACE, 23(1), 1-12.
13. Kim, H. M., Rutqvist, J., & Bae, W. S. (2014). Sensitivity analysis for fault reactivation in potential CO<sub>2</sub>-EOR site with multi-layers of permeable and impermeable formations. Geosystem Engineering, 17(5), 253-263.
14. Hawkes, C. D., Bachu, S., Haug, K., & Thompson, A. W. (2005, May). Analysis of in-situ stress regime in the Alberta Basin, Canada, for performance assessment of CO<sub>2</sub> geological sequestration sites. In Proceedings of the fourth annual conference on carbon capture and sequestration DOE/NETL, May (pp. 2-5).
15. Lucier, A., & Zoback, M. (2008). Assessing the economic feasibility of regional deep saline aquifer CO<sub>2</sub> injection and storage: A geomechanics-based workflow applied to the Rose Run sandstone in Eastern Ohio, USA. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2(2), 230-247.
16. Mazzoldi, A., Rinaldi, A. P., Borgia, A., & Rutqvist, J. (2012). Induced seismicity within geological carbon sequestration projects: maximum earthquake magnitude and leakage potential from undetected faults. International journal of greenhouse gas control, 10, 434-442.
17. Pruess, K., Oldenburg, C., & Moridis, G. (1999). TOUGH2 User's guide, Ver. 2.0., Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-43134, Berkeley, CA, USA.
18. Pruess, K. (2011). ECO2M: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO<sub>2</sub>, Including Super- and Sub-Critical Conditions, and Phase Change Between Liquid and Gaseous CO<sub>2</sub>. LBNL-4291E, Berkeley, Berkeley, CA
19. Rinaldi, A. P., Vilarrasa, V., Rutqvist, J., & Cappa, F. (2015). Fault reactivation during CO<sub>2</sub> sequestration: Effects of well orientation on seismicity and leakage.

Greenhouse Gases: Science and Technology, 5(5), 645-656.

20. Rutqvist, J., Birkholzer, J. T., & Tsang, C. F. (2008). Coupled reservoir-geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO2 injection in multilayered reservoir-caprock systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(2), 132-143.

21. Rutqvist, J. (2011). Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. *Computers & Geosciences*, 37(6), 739-750.

22. Streit, J. E., & Hillis, R. R. (2004). Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO2 in porous rock. *Energy*, 29(9), 1445-1456.

23. Vilarrasa, V., Olivella, S., Carrera, J., & Rutqvist, J. (2014). Long term impacts of cold CO2 injection on the caprock integrity. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 24, 1-13.

**김아람**



2015년 세종대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학사  
 2017년 세종대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학석사

E-mail: imark91@gmail.com

**김형목**



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2002년 동경대학교 대학원 사회기반공학과 공학박사

Tel: 02-3408-4387

E-mail: hmkim@sejong.ac.kr

현재 세종대학교 에너지자원공학과 부교수

**김현우**



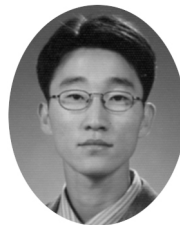
1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
 2012년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3243

E-mail: hyunwoo.kim@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 심지층연구단 선임연구원

**신영재**



1998년 서울대학교 자연대학 지구환경과학부 이학사  
 2003년 서울대학교 대학원 지구환경과학부 이학석사  
 2010년 서울대학교 대학원 지구환경과학부 이학박사

Tel: 042-868-3251

Fax: 042-868-3417

E-mail: shinn21@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 선임연구원