

가스하이드레이트 개발과정에서의 단층 재활성화 해석

김형목*, 김아람

Numerical Analysis for Fault Reactivation
during Gas Hydrate Production

Hyung-Mok Kim*, A-Ram Kim

Abstract In this paper, we perform a numerical analysis to evaluate the potential of fault reactivation during gas production from hydrate bearing sediments and the moment magnitude of induced seismicity. For the numerical analysis, sequential coupling of TOUGH+Hydrate and FLAC3D was used and the change in effective stress and consequent geomechanical deformation including fault reactivation was simulated by assuming that Mohr-Coulomb shear resistance criterion is valid. From the test production simulation of 30 days, we showed that pore pressure reduction as well as effective stress change hardly induces the fault reactivation in the vicinity of a production well. We also investigated the influence of stress state conditions to a fault reactivation, and showed that normal fault stress regime, where vertical stress is relatively greater than horizontal, may have the largest potential for the reactivation. We tested one simulation that earthquake can be induced during gas production and calculated the moment magnitude of the seismicity. Our calculation presented that all the magnitudes from the calculation were negative values, which indicates that induced earthquakes can be grouped into micro-seismic and as small as hardly perceived by human beings. However, it should be noted that the current simulation was carried out using the highly simplified geometric model and assumptions such that the further simulations for a scheduled test production and commercial scale production considering complex geometric conditions may produce different results.

Key words Fault reactivation, Methane gas production, Hydrate, Induced earthquake, Coupled analysis, Geomechanics

초 록 본 논문에서는 해저 하이드레이트 퇴적층에서의 메탄가스 생산 과정에서 발생 가능한 생산정 주변 단층의 재활성화 가능성을 수치해석을 통해 평가하고 재활성화에 따른 미소지진 규모를 예측한 결과를 소개하였다. 가스 생산에 의한 하이드레이트 퇴적층의 유효응력 변화 및 역학적 변형은 TOUGH+Hydrate 코드와 FLAC3D 코드를 순차적으로 연계해석함으로써 시뮬레이션하였다. 단층면 재활성화 기준은 모어쿨롱(Mohr-Coulomb)법칙이 유효한 것으로 가정하였다. 30일간의 시험생산 해석 결과, 감압에 의한 공극압력 감소 및 유효응력의 증가가 주변 단층의 활성화를 일으킬 가능성은 크지 않은 것으로 나타났다. 초기응력 조건에 따른 활성화 가능성을 활동마찰각으로 평가한 결과로부터 수평응력에 비해 수직응력이 상대적으로 큰 정단층 응력조건(normal fault stress regime)에서 단층 재활성화 가능성이 상대적으로 큰 것으로 파악되었다. 또한, 정단층 응력조건에서 단층 재활성화에 기인한 유도지진 발생규모를 모멘트 크기(moment magnitude)로 추정할 경우, 모두 음(-)의 값을 보여 인간이 감지하지 어려운 수준의 미소지진에 해당하는 결과를 보였다. 다만, 본 해석은 하이드레이트 생산과정에서의 단층재활성화 가능성 평가를 목적으로 한 해석기법 구축 및 그 적용성을 소개할 목적으로 상당히 단순화된 지질구조 모델을 가정한 결과이므로, 향후 하이드레이트 시험 생산 및 상업 생산 지역에서의 상세 지질구조, 입력 물성 및 생산 설계조건을 반영한 해석에서는 상이한 결과를 보일 수 있을 것이다.

핵심어 단층재활성화, 메탄가스생산, 하이드레이트, 유도지진, 연계해석, 지오메카닉스

Received: Mar. 31, 2016

Revised: Apr. 14, 2016

Accepted: Apr. 19, 2016

*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

1. 서 론

불타는 얼음(burning ice)으로 불리는 가스하이드레이트는 저온고압 조건에서 천연가스가 물분자와 물리적으로 결합하여 형성된 고체 천연가스 물질로 전 세계 사용량의 수십 년에서 수백 년 해당하는 막대한 양이

지구상에 골고루 분포되어 있어 미래 청정에너지원으로 주목을 받고 있다. 가스하이드레이트 형성을 위해서는 충분한 양의 천연가스와 물 그리고 저온고압 조건이 필요하기 때문에 주로 수심 500 m 이상의 심해저에서 대부분이 발견되어 왔다.

가스하이드레이트 실물을 채취하여 개발에 나서고 있는 나라는 미국, 일본, 중국, 인도, 한국 등에 불과하다. 하이드레이트층으로부터 가스 생산을 위해서는 일반적으로 생산정 주변 압력을 저감시킴으로써 고체 천연가스의 해리(dissociation) 현상을 유발하여 가스 상태로 변환시키는 감압법(depressurization)을 통한 생산이 가장 일반적이다. 미국에서는 캐나다, 일본 등과 공동으로 북극지역 영구동토층에 해당하는 말릭사이트(Mallik)에서 감압법을 통해 세계 최초로 가스 연속 생산에 성공한 바 있다. 또한, 알래스카 지역 북부사면 지역 Ignik Sikumi 사이트에서는 CO₂-N₂ 가스를 주입하고 감압함으로써 CO₂-NH₂ 치환법에 의한 생산에 성공한 바 있다. 일본은 2013년 태평양 연안 난카이해구(Nankai Trough) 지역에서 세계 최초로 해저 퇴적층으로부터 가스를 시험생산에 성공하고 상업생산기술을 확보하여 2023년 이후 상업적 생산을 시작할 계획을 갖고 있다. 국내에서는 2007년 동해 울릉분지에서의 조사 및 탐사를 통해 하이드레이트 퇴적층이 발견된 이래 가스하이드레이트 사업단을 출범하여 2010년 2차 시험시추를 통해 실물을 확인하고 가스 시험생산을 위한 연구개발이 진행 중에 있다.

하이드레이트 퇴적층(Hydrate Bearing Sediments, HBS)으로부터 감압법을 이용한 가스 생산과정에서는 퇴적층 내 공극압력의 감소로 인한 유효응력의 증가와 고체상태에서 기체상태로의 해리로 인한 하이드레이트층의 강성도(stiffness) 감소가 생산정 및 주변 지층의 역학적 안전성을 위협할 수 있음이 지적된 바 있다(Rutqvist et al., 2012). 유효응력의 증가는 퇴적층 내 압밀변형 및 지표면 침하를 유발하고 강성도 저하로 인한 과도한 변형은 생산 시추공의 균열 및 케이싱 파괴 등으로 이어질 수 있다(Kim et al., 2015). 또한, 생산정 주변에 대규모의 단층이 존재할 경우 단층면에 수직하게 작용하는 유효응력의 변화는 전단 미끄러짐에 대한 저항의 변화를 가져와 단층의 재활성화를 초래할 수 있다. 가스 생산과정에서의 역학적 변형을 사전 예측하고 평가하기 위한 시도로 TOUGH+Hydrate와 FLAC3D 코드를 순차적으로 해석하는 기술(T+H-FLAC)이 개발되어 사용되고 있으며(Rutqvist and Moridis, 2007), 동해 울릉분지 퇴적구조를 대상으로 가스 생산에 따른 지반 침하량 및 주변 퇴적층의 전단파괴 가능성을 예측하기 위한

시나리오 해석에도 사용되었다(임대희 외, 2013; Moridis et al., 2013; Kim, 2015; 김형목 & Rutqvist, 2015). 하이드레이트층으로부터 가스 생산으로 인한 단층재활성화 가능성 평가는 앞서 언급한 일본 난카이해구 프로젝트에서 최초로 보고되었으나 단층면에서의 미끄러짐 가능성에 대한 안전율을 평가하는 기초적 검토 수준에 해당한다(Qui et al., 2013).

최근 이산화탄소 심지층처분(Carbon Capture and Sequestration, CCS), 심부지열에너지 발전(enhanced geothermal system, EGS) 및 원유회수증진(enhanced oil recover, EOR) 등의 목적으로 심부 지층에의 유체 주입에 의한 단층 재활성화 및 유도지진 발생 문제가 제기되고 있다(Kim et al., 2013; Gan & Elsworth, 2014; Kim et al., 2014; Figueiredo et al., 2015). 고압 유체 주입에 의한 단층재활성화 및 유도지진 발생은 앞서 하이드레이트층에서의 가스 생산과정에서와 동일하게 공극 압력의 변화 및 단층면에서의 유효수직응력의 변화, 전단저항의 감소가 원인이 되어 발생하는 것으로 설명할 수 있다.

본 연구에서는 이들 유사 프로젝트에 적용된 해석기법을 이용하여 심부 해저 하이드레이트 부존층에서 가스 생산과정에서 주변 단층의 재활성화 가능성 평가를 위한 수치해석을 실시하고 재활성화에 따른 미소지진 규모를 추정된 결과를 소개하고자 한다.

2. 해석모델 및 배경이론

2.1 TOUGH+FLAC 연계해석

가스하이드레이트 함유 퇴적층(Hydrate Bearing Sediments, HBS)에서 가스하이드레이트를 생산하는 경우의 지오메카닉적 거동을 분석하기 위하여 본 연구에서는 TOUGH+Hydrate(Moridis et al., 2008)와 FLAC3D(Itasca, 2012)를 순차적으로 반복 해석하는 기법을 사용하였다. TOUGH+Hydrate 해석코드를 통하여 가스하이드레이트 해리 및 가스 유동, 열역학적 거동 해석을 수행하였고, 주변 퇴적층의 역학적 변형은 FLAC3D를 사용하여 순차적으로 반복해석하는 기법을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 가스하이드레이트 해리 과정에서 발생하는 가스 압력 상승, 공극 압력 감소와 유효응력의 변화, 이에 따른 공극률과 투과특성의 변화, 하이드레이트 해리에 따른 퇴적압반의 강도 및 강성도와 같은 역학적 특성 변화는 FLAC3D의 FISH 함수를 사용한 연계모듈을 통해 계산결과를 상호 참조하는 방식을 채택하고 있다. Fig. 1은 TOUGH+Hydrate와 FLAC3D 연계해석하는 과정을 나타낸다. TOUGH+Hydrate 해석을 통하여 열역학적 파라미터 (온도, 유체압력, 포화도) 등을 계산하

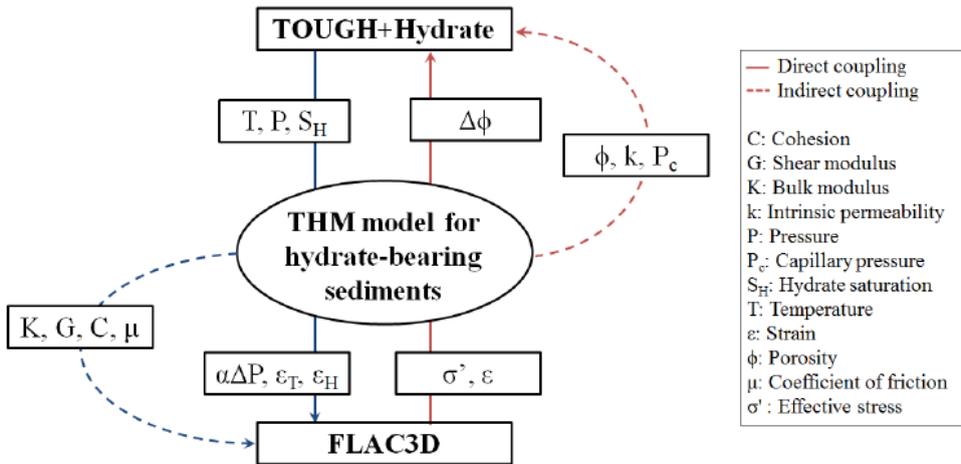
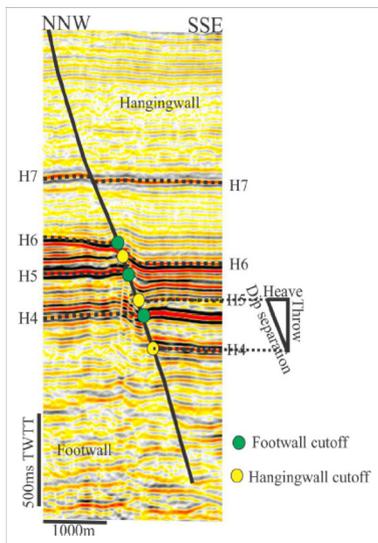
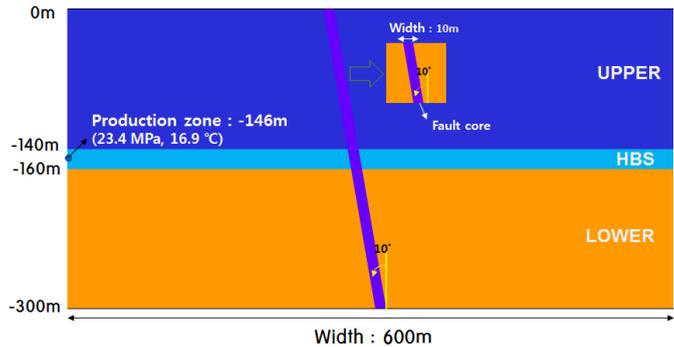


Fig. 1. Schematic of TOUGH+Hydrate and FLAC3D coupled simulation (Rutqvist and Moridis, 2007)



(a) Example of fault within offshore hydrocarbon formation (Mohammedyasin, 2015)



(b) Analysis model in the current study

Fig. 2. Geometry of simulation region and analysis conditions

고 이를 통해 유효응력과 열응력을 업데이트한다. 업데이트한 정보를 이용한 FLAC3D 응력-변형을 계산을 통하여 공극률 변화를 계산하여 TOUGH+Hydrate 계산을 반복하게 된다(Kim and Rutqvist, 2014).

2.2 해석모델 및 조건

해저 퇴적층에서의 단층 재활성화 해석은 극히 제한적이므로 Fig. 2(a)에 보고된 결과를 참고로 하여 임의

의 단층면 및 구조를 가정하고 가스하이드레이트 퇴적층의 구조 및 물성은 동해 울릉분지 특성값을 사용하여 해석모델을 구성하였다(Moridis et al., 2013; Kim, 2015). Fig. 2(b)는 본 연구에서 사용한 해석모델로 수평 생산정을 이용하여 가스하이드레이트 회수 생산을 모사하기 위한 해석 모델로 평면 변형을 조건에 해당한다. 해석영역의 크기는 가로 600 m, 세로 300 m로 설정하였으며 가스하이드레이트 퇴적층은 해저면으로부터 140

Table 1. Thermodynamic properties in the analysis (Moridis et al., 2013)

Parameter	Value		
Initial pressure at sea bed floor (MPa)	21.9		
Initial temperature at sea bed floor (°C)	0.482		
Water salinity (mass fraction)	0.035		
Initial saturations in the HBS	0.5		
Intrinsic permeability (m ²)	HBS	Upper	Lower
	1.75×10 ⁻¹³	9.9×10 ⁻¹⁸	9.99×10 ⁻¹⁸
Porosity (-)	0.67	0.76	0.63
Dry thermal conductivity (W/m/K)	0.5		
Wet thermal conductivity (W/m/K)	3.1		
Specific heat (J/kg/K)	1000		
Relative permeability model (Moridis et al., 2008)	$k_{rA} = (S_A^*)^n$ $k_{rG} = (S_G^*)^m$ $S_A^* = (S_A - S_{irA}) / (1 - S_{irA})$ $S_G^* = (S_G - S_{irG}) / (1 - S_{irA})$		
		HBS	Upper & Lower
	n	3.5	5.0
	m	2.5	3.0
	S_{irA}	0.01	0.05
S_{irG}	0.20	0.50	
Capillary pressure model (van Genuchten, 1980)	$P_{cap} = -P_0[(S^*)^{-1/\lambda} - 1]^{-\lambda}$ $S^* = \frac{(S_A - S_{irA})}{(S_{mxA} - S_{irA})}$		
		HBS	Upper & Lower
	λ	0.45	0.115
	S_{irA}		1
	$1/P_0$	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
S_{mxA}		1.0	

Table 2. Geomechanical properties in the analysis

	HBS	UPPER	LOWER	FAULT
Bulk modulus (MPa)	667	233	667	335
Shear modulus (MPa)	609	24	69	164
Cohesion (MPa)	-	-	-	0.5
Friction angle (°)	-	-	-	25

m에서 160 m 심도에 위치하고 있으며 20 m의 두께를 가진다. 생산지점의 심도는 지하 146 m 지점으로 초기 공극압력과 온도는 각각 23.4 MPa 및 16.9°C이다. 해석에 사용한 제반 입력 물성값은 Table 1 및 Table 2에 제시하였다. 가스하이드레이트 회수 생산과정에서는 해리에 의한 주변 지층의 강성변화가 예상되지만 본 연구

에서는 이들 강성변화에 의한 효과는 무시하고 가스 생산 과정에서의 단층 재활성화 평가를 주된 목적으로 하였다. 단층면은 모어쿨롱(Mohr-Coulomb) 파괴거동을 하는 것으로 가정하고, 경사각은 10°, 단층대의 두께는 10 m, 투과계수는 0.99×10⁻¹⁷ m²로 설정하였다.

기본 해석조건으로 생산량 0.1 kg/s로 30 일 동안 시

험 생산하는 것을 가정하였다. 초기응력 분포는 수평응력(σ_h)과 수직응력(σ_v)이 동일한 등방응력조건을 가정하고, 초기 응력조건이 해석결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 정단층 응력조건($K = \sigma_h/\sigma_v = 0.7$) 및 역단층 응력조건($K=1.2$)에 대한 해석을 추가적으로 실시하여 결과를 비교 분석하였다.

2.3 단층 재활성화에 따른 지진규모의 추정

단층 재활성화에 의해 발생하는 지진의 규모는 미끄러짐이 발생하는 동안의 에너지 방출이 단층면에서의 파쇄면적(rupture area), 전단변위 및 전단 물성과 연관성이 높은 것으로 보고되어 왔으며, Hanks & Kanamori (1979)는 지진 모멘트(seismic moment)를 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$M_0 = S \times D_{avg} \times A \tag{1}$$

여기서 S는 암반의 전단변형계수(Shear modulus, Pa), D_{ave} 는 단층면을 따라 발생한 평균전단변위(m), A는 파쇄면적(m^2)을 나타내며 일반적으로 파쇄면적은 원형으로 가정된다. 따라서, 지진 모멘트(M_0)는 $N \cdot m$ 의 단위로 표시된다.

지진의 규모는 모멘트를 이용하여 식 (2)와 같이 계산할 수 있으며 이러한 지진 규모 추정방식은 CO₂ 심지층 처분 해석에서도 적용된 바 있다(Cappa & Rutqvist,

2011; Mazzoldi et al., 2012).

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 6.06 \tag{2}$$

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 기본해석결과

Fig. 3에서 5는 기본해석조건에서의 생산 개시 30일 후의 주요 해석결과로 Fig. 3은 단층면에서의 공극압력(a), 유효수직응력(b), 전단응력(c), 전단변형률(d) 증분을 나타낸 것이다. 감압법에 의한 가스하이드레이트 생산으로 인해 HBS층 내부(해저면으로부터 심도 140에서 160 m 구간)에서 공극 압력이 감소하여 유효응력의 증가를 초래하고 있다. 전단응력은 HBS층 상부 및 하부에서 그 절대값이 증가하여 Fig. 3(d)와 같은 전단변형을 일으킨다. HBS층 내부 공극 압력의 변화는 초기 HBS층 내부 및 생산정 주변에서만 발생하나 30일 이후 생산정 공저압력은 3 MPa까지 감소하여 HBS층 주변 및 단층면까지 광범위하게 전파됨을 알 수 있다. Fig. 5는 생산 개시 후 시간경과에 따른 전단변형률 발달 양상을 나타낸 것이다. 생산이 진행됨에 따라 단층면에서의 전단변형이 증가함을 알 수 있으며 특히 HBS 상부 및 하부에 전단변형이 집중적으로 발생하고 있다.

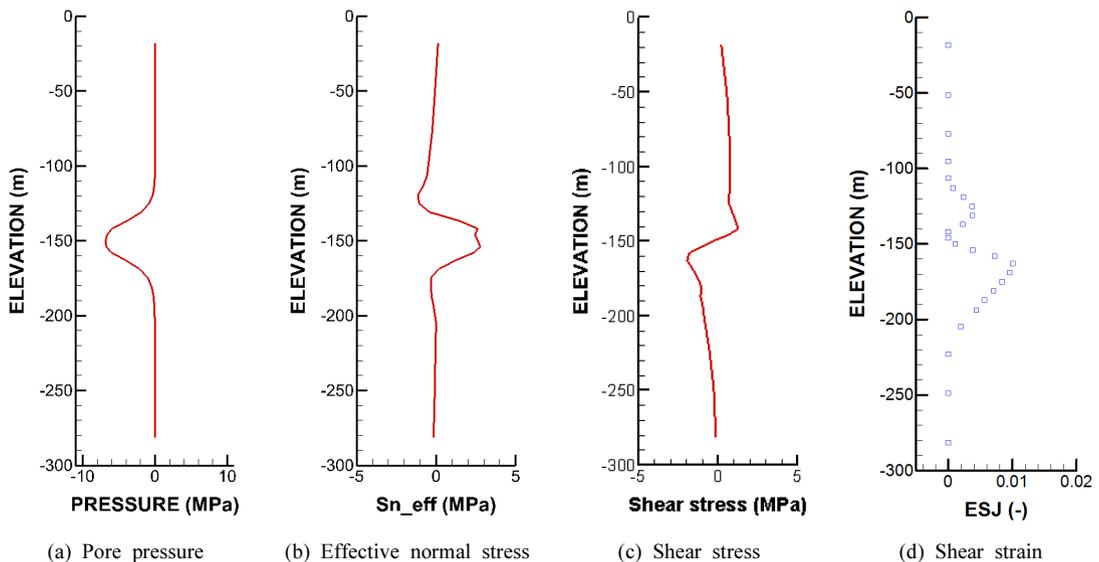


Fig. 3. Results of base case simulation along the fault plane

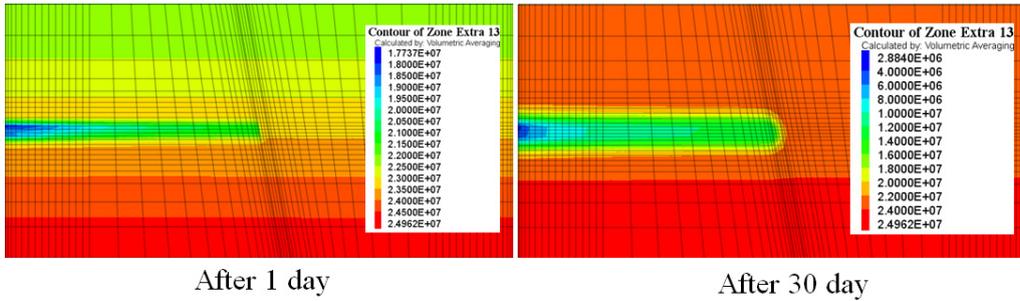


Fig. 4. Pore pressure evolution after gas production

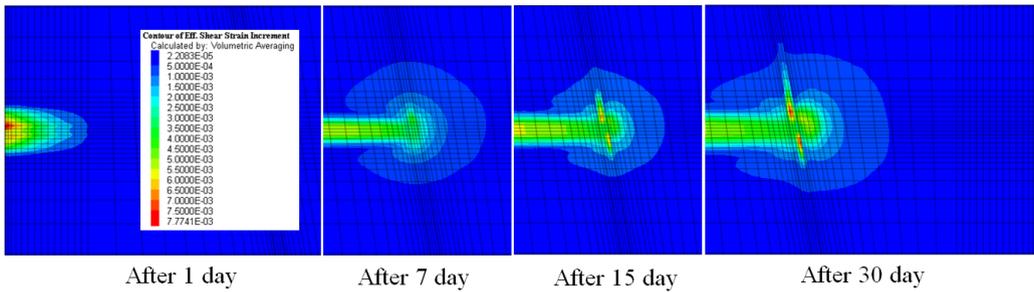


Fig. 5. Shear strain evolution at various elapsed time after gas production

3.2 활동마찰계수를 이용한 전단 미끄러짐 가능성 평가

Fig. 6은 30일 간의 생산기간 동안 3개의 조사점(하이드레이층 상부(top), 하부(bottom) 및 가운데(middle))에 해당하는 심도에서의 활동마찰계수(Mobilized friction coefficient)의 변화를 단층면에서의 초기 마찰각에 해당하는 마찰계수와 함께 표시한 것이다. 단층면에서의 전단응력과 수직응력비로 식 (3)과 같이 계산되는 활동마찰계수가 단층면의 초기 마찰계수 값($\tan(25^\circ)=0.47$)에 도달할 경우 전단 미끄러짐이 발생함을 의미한다 (Kim et al., 2016).

$$\tan(\phi_{mob}) = \frac{\tau}{\sigma'_n} \quad (\tau : \text{전단응력}, \sigma'_n : \text{유효수직응력}) \quad (3)$$

생산 초기 활동마찰계수는 점진적으로 증가하고 생산이 진행됨에 따라 점차 감소하여 일정한 값을 보이는 경향을 나타낸다. 이러한 거동은 공극 압력의 변화가 유효 수직응력에 미치는 영향이 수직 및 수평 방향에 따라 상이하기 때문에 기인한다. 3개 조사점 모두 전단 미끄러짐은 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

Fig. 7은 정단층 및 역단층 초기응력조건에서의 결과

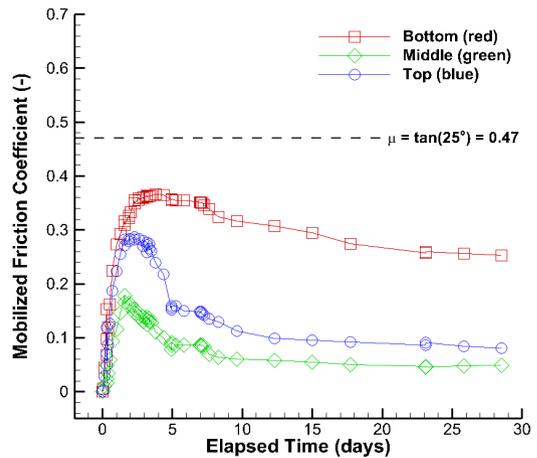
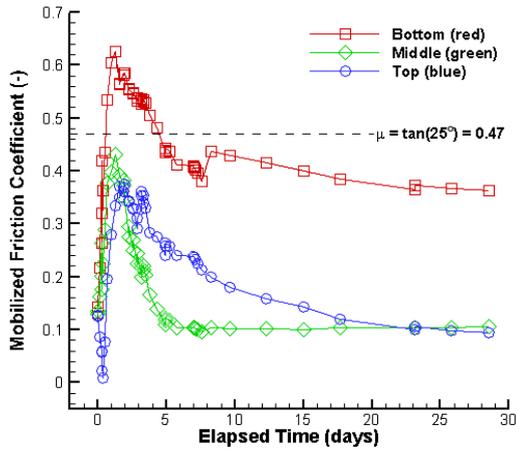
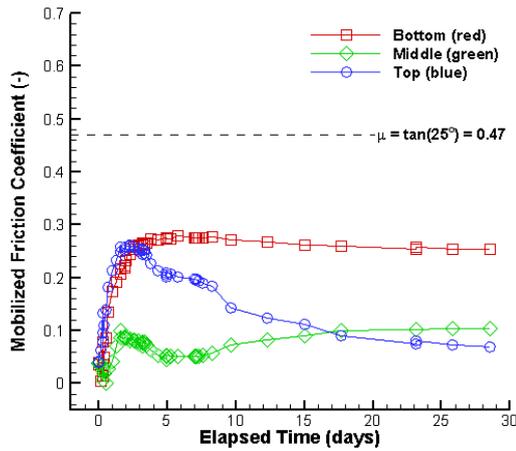


Fig. 6. Mobilized friction coefficient of the base case with isotropic stress conditions

를 나타낸다. 역단층 응력조건에서는 등방성 응력조건과 유사한 결과를 보였으나, 정단층 응력조건인 경우 상대적으로 활동마찰계수 값이 높게 평가되어 미끄러짐에 취약한 조건에 해당하고, 특히 하이드레이트층 하



(a) Normal fault stress regime



(b) Reverse fault stress regime

Fig. 7. Mobilized friction coefficient of anisotropic stress conditions

부에서 전단 미끄러짐이 발생하는 것으로 해석되었다 (Fig. 7a).

3.3 가스 생산에 의한 유도 지진 규모 추정

Fig. 8은 정단층 응력조건에서의 단층 재활성화 해석으로부터 계산된 단층면 전단변위 및 지진규모 예측결과를 함께 나타낸 것이다. Fig. 3(d)의 결과로부터 미끄러짐 발생 면적 및 평균전단변위를 계산하여 식 (1) 및 (2)로부터 지진 모멘트 및 규모를 추정하였다. 추정된 지진 규모는 모두 음(-)의 값(최대 규모 = -0.185)으로 매우 작은 규모의 미소지진이 발생하는 것으로 예측되었다. 이러한 미소지진은 인간이 감지할 수 없을 정도의 낮은 수준에 해당한다(NRC, 2013).

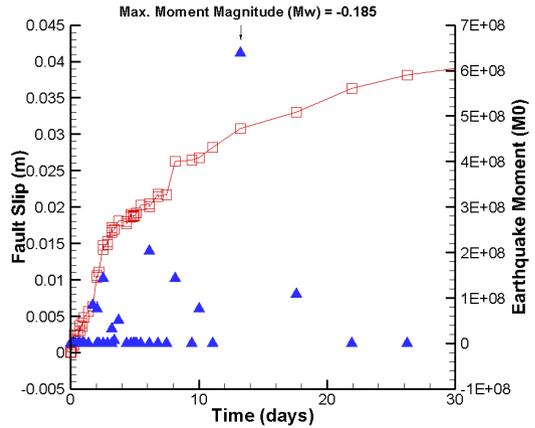


Fig. 8. Shear slip (line) and induced earthquake magnitude (triangular dots) by the moment analysis

또한, 전단변위는 시간에 따라 점진적으로 증가하는 미지진성(aseismic) 형태로 발생하며 최대 4 cm의 값을 보였다. 다만, 단층면의 미끄러짐 거동 특성에 따라서는 지진성(seismic) 변위가 특정 시점에 급격하게 발생할 수 있고 지진성 단층 재활성화의 경우 상당한 투과특성의 변화를 동반할 수 있다(Rutqvist et al., 2013). 향후 상업 생산 단계에서는 단층면의 연화거동(slip-softening) 등과 같은 전단거동 특성에 대한 검토가 필요할 것이다.

4. 결론

본 고에서는 해저 하이드레이트 퇴적층에서의 가스 생산 과정에서 발생 가능한 생산정 주변 단층의 재활성화 가능성 평가방법을 구축하고 간략화된 해석모델을 사용한 기초해석결과를 소개하였다. 가스하이드레이트 생산 해석 및 역학적 변형은 TOUGH+Hydrate 코드와 FLAC3D 코드를 순차적으로 연계해석함으로써 구현하였다.

기초해석 결과, 감압에 의한 공극압력 감소 및 유효응력의 증가가 주변 단층의 활성화를 일으킬 가능성은 크지 않은 것으로 나타났으나, 수평응력에 비해 수직응력이 상대적으로 큰 정단층 응력조건(normal fault stress regime)에서 단층 재활성화 가능성이 상대적으로 큰 것으로 파악되었다.

또한, 가스 생산과정에서의 단층 재활성화에 기인한 유도지진 발생규모를 모멘트 크기(moment magnitude) 방식으로 추정된 결과, 모두 음(-)의 값으로 추정되어 미소지진 수준에 해당하는 결과를 보였다. 다만, 본 기초해석은 하이드레이트 생산과정에서의 단층 재활성화

가능성 평가를 목적으로 구축한 해석기법의 적용성 시험을 목적으로 상당히 단순화된 지층 및 지질구조 모델을 사용한 결과이므로, 실제 상세 지질구조, 입력 물성 및 단층 미끄러짐 거동 특성을 고려한 해석에서는 상이한 결과를 보일 수 있다.

구축된 해석기법은 가스하이드레이트 개발 사업 예비 단계에서의 주변 단층의 재활성화 가능성 및 이로 인한 유도지진의 규모 예측을 통해 사업의 인허가 및 상세 생산조건의 설계에 활용할 수 있다. 또한, 단층 재활성화에 따른 투과특성 변화를 고려할 경우, 단층면을 따른 메탄가스 누출 거동을 평가할 수 있어, 향후 동해 울릉분지 상세 지질구조 및 단층 정보를 반영한 시험생산 예비해석, 타당성 평가 및 생산 설계 등에 활용이 기대된다. 본 고에서 소개한 해석기법은 하이드레이트 해리 및 유동을 시뮬레이션하기 위한 해석코드와 응력/변형을 해석을 위한 코드를 순차적으로 해석하는 방식으로 이산화탄소를 비롯한 주입 유체의 유동을 모사할 수 있는 여타 유체역학코드와 결합할 경우 이산화탄소 심지층 처분을 위한 CCS사업 및 심부지열에너지개발을 위한 EGS사업에서의 단층 재활성화 및 유도지진 규모 예측 및 평가에도 활용할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 2013R1A1A2004605). 지원에 감사드립니다.

References

1. 김형목, J. Rutqvist, 2015, “호층 구조 가스하이드레이트 퇴적층에서 수직 생산정을 이용한 가스 회수생산 해석”, 2015 한국암반공학회 춘계 총회 및 학술발표회 발표자료집, 2015년 3월, pp. 303-307.
2. 임대희, 김정규, 송재준, 2013, “감압법을 이용한 가스하이드레이트 회수생산시 해저지반 거동예측에 관한 수치해석적 연구, 2013 한국암반공학회 추계 총회 및 학술발표회 발표자료집, 2013년 10월, pp. 206-211.
3. Cappa, F. and J. Rutqvist, 2011, “Modeling of coupled deformation and permeability evolution during fault reactivation induced by deep underground injection of CO₂”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 5, pp. 336-346.
4. Figueiredo, B., C.F. Tsang, J. Rutqvist, J. Bensabat, and A. Niemi, 2015, “Coupled hydro-mechanical processes and fault reactivation induced by CO₂ injection in a three-layer storage formation”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 29, pp. 432-448.
5. Gan, Q. and D. Elsworth, 2014, “Analysis of fluid injection-induced fault reactivation and seismic slip in geothermal reservoirs”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 199(4), pp. 3340-3353.
6. Hanks, T.C and H. Kanamori, 1979, “A moment magnitude scale”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, pp. 2348-2350.
7. Itasca, 2012, *FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Version 4.0, Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, pp.438. 2009.
8. Kim, A.R., J.W. Lee and H.M. Kim, 2015, “A case study of test production of gas from hydrate bearing sediments on Nankai trough in Japan”, *Tunnel and Underground Space* Vol. 25, No. 2, pp. 133-143.
9. Kim, A.R. and H.M. Kim, 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* Vol. 26, No. 1, pp. 12-23.
10. Kim. H.M and J. Rutqvist, 2014, “Geomechanical model analysis for the evaluation of mechanical stability of unconsolidated sediments during gas hydrate development and production”, *Tunnel and Underground Space* Vol. 24, No. 2, pp. 143-154.
11. Kim. H.M, J. Rutqvist, and W.S. Bae, 2014, “Sensitivity analysis for fault reactivation in potential CO₂-EOR site with multi-layers of permeable and impermeable formation”, *Geosystem Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 253-263.
12. Kim H.M., 2015, “Numerical analysis for geomechanical deformation of sea bed due to gas hydrate dissociation”, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.* Vol. 52, No. 2, pp. 148-157.
13. Kim H.W., D.S. Cheon, B.H. Choi, H.S. Choi and E.S. Park, 2013, “Case Study on Stability Assessment of Pre-existing Fault at CO₂ Geologic Storage”, *Tunnel and Underground Space* Vol. 23, No. 1, pp. 13-30.
14. Mazzoldi, A., A.P. Rinaldi, A. Borgia and J. Rutqvist, 2012, “Induced seismicity within geological carbon sequestration projects: Maximum earthquake magnitude and leakage potential from undetected faults”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 10, pp. 434-442.
15. Mohammedyasin, M.S., 2015, *Deep-seated faults and hydrocarbon leakage in the Snøhvit Gas Field, Hammerfest Basin, southwestern Barents Sea*, Msc. thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU) - Trondheim, p. 97.
16. Moridis, G.J., M.B., Kowalsky and K. Pruess, 2008, *TOUGH+HYDRATE v1.0 USER'S MANUAL: A code for the simulation of system behavior in hydrate bearing geologic media*, LBNL-149E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720.
17. Moridis, G.J., J. Kim, M.T. Reagan and S.J. Kim, 2013, “Feasibility of gas production from a gas hydrate accumulation at the UBGH2-6 site of the Ulleung basin in the Korean East Sea”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 108, pp. 180-210.
18. NRC (National Research Council), 2013, *Induced seismicity*

- potential in energy technology, Washington D.C., The National Academies Press, p. 211.
19. Rutqvist, J and G.J. Moridis, 2007, "Numerical studies of geomechanical stability of hydrate-bearing sediments", Offshore technology conference, 2007 May, Houston, Texas, U.S.A.
 20. Rutqvist, J., G.J. Moridis, T. Grover, S. Silpnagarmert, T. Collett and S.A. Holdich, 2012, "Coupled multiphase fluid flow and wellbore stability analysis associated with gas production from oceanic hydrate-bearing sediments", J. Petroleum Science and Engineering, Vol. 92-93, pp. 65-81.
 21. Rutqvist, J, A.P. Rinaldi, F. Cappa and G.J. Moridis, 2013, "Modeling of fault reactivation and induced seismicity during hydraulic fracturing of shale-gas reservoirs", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 107, pp. 31-44.
 22. Qui, K., K. Yamamoto, R. Birchwood, Y. Chen, C. Wu, C.P. Tan and V. Singh, 2013, "Evaluation of Fault Reactivation", Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 30 April - 3 May 2012, OTC 22890.
 23. van Genuchten, M.T., 1980, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," Soil Sci Soc Am J., Vol. 44, pp. 892-898.

김형목



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

Tel: 02-3408-4387
E-mail: hmkim@sejong.ac.kr
현재 세종대학교 에너지자원공학과 부
교수

김아람



2015년 세종대학교 공과대학 에너지자
원공학과 공학사

E-mail: irmark91@gmail.com
현재 세종대학교 공과대학 에너지자원
공학과 석사과정
