

가스하이드레이트 개발생산과정에서의 미고결 퇴적층의 역학적 안정성 평가를 위한 지오메카닉스모델 해석

김형목*, Jonny Rutqvist

Geomechanical Model Analysis for the Evaluation of Mechanical Stability of Unconsolidated Sediments during Gas Hydrate Development and Production

Hyung-Mok Kim*, Jonny Rutqvist

Abstract In this study, we simulated both dissociation of gas hydrate and mechanical deformation of hydrate-bearing sedimentary formation using geomechanical model. The geomechanical model analysis consists of two distinct codes of TOUGH+Hydrate and FLAC3D. The model is characterized by the fact that changes of temperature, pressure, saturation and their influence on the consequent evolution of effective stress, stiffness and strength of hydrate-bearing sediments during gas production could be well simulated. We compared the results of simulation for two different production methods, and showed that combination of depressurization and thermal stimulation results in the enhancement of production rate especially at early stage. We also presented that the hydrate dissociation-induced geomechanical deformation in unconsolidated clay is much larger than that in sandstone.

Key words Gas hydrate, Dissociation, Geomechanical model, Depressurization, Thermal stimulation, TOUGH+Hydrate, FLAC3D

초 록 본 연구에서는 지오메카닉스모델을 이용한 가스하이드레이트 회수 생산 과정에서의 해리 발생 및 이에 따른 주변 퇴적층의 역학적 변형을 시뮬레이션 하였다. 지오메카닉스모델은 TOUGH+Hydrate와 FLAC3D 해석 코드를 순차적으로 반복해석하는 기법으로 감압법을 이용한 가스하이드레이트 회수 생산과정에서의 온도, 압력, 포화도 변화가 생산정 주변 퇴적층 내 유효응력, 강성 및 강도 변화에 미치는 영향을 고려할 수 있는 특징이 있다. 회수생산 방식에 따른 모델해석결과 비교를 통해, 감압법과 열자극법을 병행하는 경우 초기 생산량 증대를 가져올 수 있음을 보였다. 또한, 미고결 점토질 퇴적층에서의 회수생산 시 사암층에 비해 상대적으로 변형이 크게 발생함을 보였다.

핵심어 가스하이드레이트, 해리, 지오메카닉스모델, 감압법, 열자극법, TOUGH+Hydrate, FLAC3D

1. 서 론

최근 기존의 석유, 천연가스 등과 같은 재래형 탄화수소 에너지(conventional hydrocarbon energy)를 대체할

새로운 에너지원으로 비재래형 탄화수소에너지(non-conventional hydrocarbon energy)에 대한 관심이 급증하고 있다. 비재래형 탄화수소에너지로는 오일셰일(oil shale), 오일샌드(oil sand), 셰일가스(shale gas) 및 가스하이드레이트(gas hydrate) 등이 있으나 국내의 경우 가스하이드레이트의 부존만이 시추를 통해 확인된 바 있다(Ryu et al., 2011).

가스하이드레이트는 메탄가스로 대표되는 천연가스가 저온 고압 조건에서 물분자와 물리적으로 결합된 고체물질로, 상온 상압 상태에서는 물과 가스로 분리되는 해리(dissociation) 현상을 보인다. 이러한 해리과정

Received: January 28, 2014

Revised: March 7, 2014

Accepted: March 7, 2014

***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

에서 단위 부피(1 m^3)의 가스하이드레이트로부터 약 170 m^3 의 가스가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 시베리아, 알래스카 등의 영구동토 지역과 수심 500 m 이상의 심해지역 퇴적층에 광범위하게 분포하는 것으로 알려진 가스하이드레이트는 환경오염 및 부존량 제한의 한계를 보이는 석유에너지를 대체할 차세대 청정에너지원으로 큰 주목을 받고 있다. 가스하이드레이트 매장량은 전세계적으로 액화천연가스(LNG) 환산 ton 기준 약 10 조 ton 가량으로 추정되고 있으며 이는 세계 에너지 수요를 350 년 이상 공급할 수 있는 규모에 해당한다(Huh, 2005).

국내에서도 동해 지역의 탐사와 시추를 통해 약 6 억 톤 이상의 가스하이드레이트가 매장된 것으로 보고된 바 있으며, 이후 2014년까지 ‘가스하이드레이트개발 기본계획’을 수립하고, ‘가스하이드레이트사업단’을 중심으로 가스하이드레이트 부존 유망지역 평가, 생산 기술의 개발을 통해 2015년 이후 시험 생산을 통해 가스하이드레이트 상업용 생산 기술 확보를 목표로 하고 있다(가스하이드레이트사업단, 2014).

가스하이드레이트로부터 천연가스의 회수 생산을 위해서는 고체상태로 존재하는 하이드레이트 부존 지층에 갑압, 열자극 및 화학물질 주입을 통해 고체 하이드레이트에서 기체 가스로의 상변화에 해당하는 해리(dissociation) 과정을 유발시켜 가스를 회수하게 된다. 그러나, 가스하이드레이트의 해리 과정에서는 가스 압력 상승에 따른 주변 퇴적층 내 유효응력의 감소와 고체상태에서 기체로의 상변화로 인한 퇴적층의 강도 저하 및 강성도 감소 등으로 지반 침하, 생산정 붕괴, 생산정 인근 해저 사면 파괴 등과 같은 위험요인이 지적되어 왔다(Lee, 2009). Kwon and Cho (2008)는 가스하이드레이트가 해리하게 되면 10 MPa의 일정 압력하에서도 2.62배의 부피 팽창이 발생하여 주변 미고결 퇴적층의 공극압력 상승 및 강성도(stiffness), 강도(strength) 변화 등을 유발함으로써 역학적 불안정성을 초래할 수 있음을 보고한 바 있다. Park (2008)은 가스하이드레이트를 포함한 미고결 퇴적층에서는 암석입자사이의 빈공간이 고체 상태의 하이드레이트 혹은 얼음으로 채워져 있는 상태로 해리과정에서 이들 고체가 기체 혹은 액체로 상변화를 일으킬 경우 주변 암반의 강도 저하 및 강성도 감소를 가져와 사면 붕괴 등의 심각한 역학적 불안정성을 초래할 가능성을 보고하였다. 임대희 등(2013)은 갑압법에 의한 가스하이드레이트 해리 실내실험 결과를 이용하여 해리에 의한 역학적 물성변화 경험식을 지반 응력해석에 고려함으로써 지반 침하량을 산출하였다.

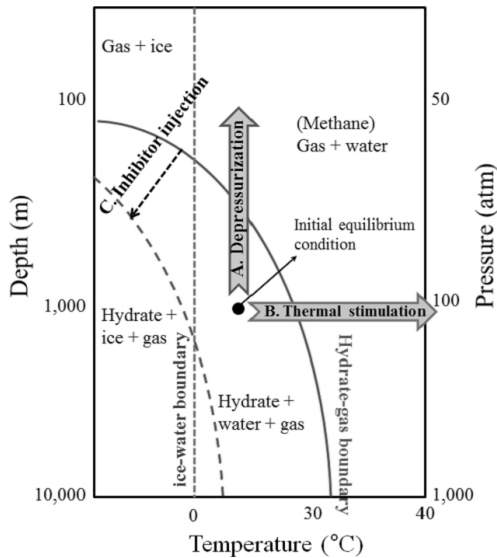
가스하이드레이트의 생산 및 해리 과정에서 발생하는 주변 지층 내 온도 및 공극압력 변화는 해저지반의 역학적 변형을 초래할 수 있으며 지반 내 공극부피 및 유효응력 변화와 같은 역학적 변형은 천연가스 및 지하수 유동 양상의 변화를 유발하여 천연가스 생산량에 영향을 미친다. 따라서, 가스하이드레이트 생산 과정에서 발생하는 주변 지층의 환경변화는 열적, 수리적, 역학적 거동이 독립적으로 발생하기 보다는 상호 연계된 복합 거동의 형태로 나타난다고 할 수 있다. 가스하이드레이트 회수생산 과정에서 예상되는 이러한 역학적 변형 양상을 모사할 수 있는 시뮬레이션 기법은 극히 제한적으로 TOUGH+Hydrate(Moridis et al., 2008)와 FLAC3D(Itasca, 2002)를 연계하여 육상 영구동토 및 해저지반에서의 회수생산 사례해석 연구결과(Ruqvist et al., 2009, 2012)는 보고된 바 있으나 실내실험 및 현장실험 결과와의 비교·검증까지는 이루어지지 못했다.

2015년 이후 국내에서도 계획되어 있는 가스하이드레이트 생산과정에서의 시추공의 안정성 평가 및 생산 시설의 장기적 성능 평가를 위해서는 이들 상호 복합 거동을 이해하기 위한 실험적 연구와 시뮬레이션 기법을 통한 실험 결과의 재현 및 현장 결과 사전 예측기술이 병행되어야 한다(Lee et al., 2011). 본 연구에서는 가스하이드레이트 회수생산 과정에서의 주변 퇴적암반의 열-수리-역학적 복합 거동을 시뮬레이션 할 수 있는 지오메카닉스모델 해석을 통해 가스하이드레이트 생산 과정을 전산모사하고 생산방식에 따른 차이, 주변 퇴적층의 역학적 특성에 따른 결과 차이를 비교, 분석하였다.

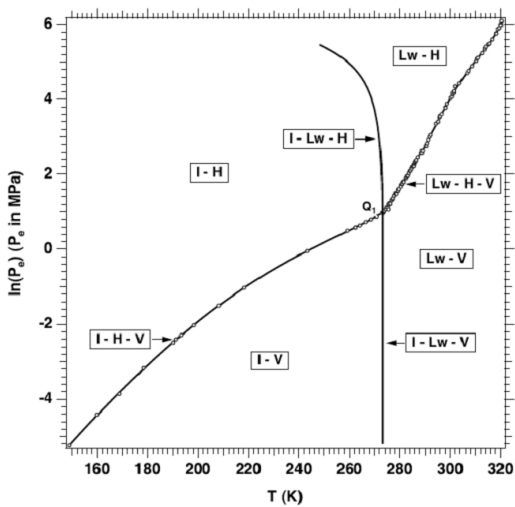
2. 배경이론

2.1 가스하이드레이트 회수생산 원리

Fig. 1은 가스하이드레이트의 평형상태를 나타내는 온도-압력 평형곡선으로 곡선 하부의 저온-고압 상태에서 하이드레이트는 고체 결정형태로 존재한다. 따라서, 가스 회수생산을 위해서는 하이드레이트 부존지층의 온도-압력 조건이 평형곡선 외부에 위치하도록 교란시킴으로써 해리(dissociation)를 유발하여 메탄가스를 비롯한 가스를 회수생산할 수 있다. 가스하이드레이트 회수 생산방식은 일반적으로 갑압법(depressurization method), 열자극법(thermal stimulation method), 억제제 주입법(inhibitor injection method)의 3가지로 분류된다. 갑압법은 일정 온도조건하에서 양수(pumping)를 통해 주변 압력을 저하시킴으로써 Fig. 1a의 A와 같은 상태 변화를 일으켜 하이드레이트의 해리를 유발하고 가스를 회수하는 방식이다. 열자극법은 일정 압력조건하에서 스



(a) Schematic diagram



(b) In TOUGH+Hydrate calculation (Moridis et al., 2008) (Lw: liquid water, H: hydrate, V: vapor (gas phase), I: ice)

Fig. 1. Pressure-temperature equilibrium relationship in the phase diagram of the water-CH₄-hydrate system

팀(steam) 혹은 열수(hot water) 순환방식을 통해 하이드레이트 내부 온도를 상승시킴으로써 해리를 유발하는 방식이다 (Fig. 1a의 B). 억제제 주입법은 알코올(alcohol), 염화나트륨(NaCl) 등과 같은 화학물질을 주입함으로써 새로운 온도-압력 평형곡선을 조성하는 방식에 해당한다(Fig. 1a의 C). 감압법은 압력 저하를 통

Overburden rock
Hydrate Bearing Sediments
Underlying beds
<ul style="list-style-type: none"> - Class I : Free gas & Water zone - Class II : Water zone - Class III : Neither free gas nor water zone

Fig. 2. Classification of gas hydrate deposits (Modified from Sung et al., 2009)

한 충분한 해리 영역을 확보하기 위해 상대적으로 오랜 시간이 걸리고, 열자극법은 회수생산을 위해 추가적인 열에너지가 공급되어야 한다. 억제제 주입법은 단독으로 사용되기보다는 감압법 혹은 열자극법의 효율 향상을 위한 보조공법으로 주로 채택된다. Fig. 1b는 본 연구에서 사용한 TOUGH+Hydrate 계산과정에서 채택한 온도-압력 평형곡선이다.

2.2 가스하이드레이트 부존 형태에 따른 회수생산 방식

가스하이드레이트 부존형태는 하부 지층에의 가스 및 대수층 존재유무에 따라 Fig. 2와 같이 3개의 범주(class)로 분류할 수 있다. 범주 I의 경우, 하이드레이트층 하부에 유동성의 메탄가스 및 대수층이 존재하는 경우로 두 층의 밀도차에 의해 가스하이드레이트층 탐사에 유리한 모방반사면(bottom simulating reflector, BSR)을 수월하게 관측할 수 있는 특징이 있다. 범주 II는 하이드레이트층 하부에 유동성 메탄가스는 희박하나 대수층이 존재하는 경우이고, 범주 III은 하부에 유동성 유체가 존재하지 않는 경우에 해당한다(Sung et al., 2009).

하이드레이트층 하부에 유동성 유체의 존재유무는 감압법에 의한 회수생산 방식 적용여부를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 하이드레이트층 하부에 유동성 유체가 존재할 경우, 양수(pumping)를 통해 공극압력을 저하시킬 수 있고 이들 압력저하가 하이드레이트층까지 확산되어 압력변화에 따른 해리과정을 통해 메탄가스를 상대적으로 수월하게 회수생산할 수 있다. 따라서, 가스하이드레이트 부존형태에 따른 범주 중, 범주 I, 범주 II의 경우, 감압법을 이용한 생산이 가능하나 범주 III의 경우, 열자극법을 이용한 생산방식을 고려하여야 한다. 또한, 이들 감압법 및 열자극법을 병행하거나 복수의 생산정을 적절히 배치함으로써 생산효율을 향상시킬 수 있다.

3. 가스하이드레이트 회수생산 과정 시뮬레이션을 위한 지오메카닉스모델

3.1 TOUGH+Hydrate - FLAC3D 연계해석

본 연구에서는 가스하이드레이트 회수 생산과정에서 발생하는 가스하이드레이트 해리, 가스 유동, 공극압력 변화, 주변 퇴적층의 강도 및 변형 특성 변화를 서로 다른 2개의 해석코드를 순차적으로 반복 해석함으로써 모사하였다. 가스하이드레이트 해리 및 가스/지하수 유동 해석에는 TOUGH+Hydrate 해석코드(Moridis et al., 2008)를 사용하였고, 주변 퇴적층의 역학적 변형은 FLAC3D(Itasca, 2002)를 사용하여 시뮬레이션하였다. 해리 과정에서 발생하는 가스 압력 상승과 유효응력의 변화, 이에 따른 공극구조 및 투과특성 변화, 하이드레이트 해리에 따른 퇴적압반의 강도 및 강성도와 같은 역학적 특성 변화는 FLAC3D의 FISH 함수를 사용한 연계모듈(coupling module)을 통해 계산결과를 상호 참조하는 방식(Rutqvist and Moridis, 2007)을 채택하고 있다. 이는 기존의 암반내 열-수리-역학적 복합거동 해석을 위한 연구방식(Kim et al, 2011)에서 다성분 열 유체 유동을 시뮬레이션하는 TOUGH2(Pruess et al., 1999)를 채용한 점만 상이하다.

TOUGH+Hydrate 해석코드에서도 퇴적층 내 공극압력 변화에 따른 공극률 및 투과특성 변화를 고려하기 위한 기본적인 기능은 제공하고 있으나 기초적인 경험식에 근거하기 때문에 그 적용성에 제약이 있다. 따라서, 기존의 다양한 사례연구를 통해 검증된 FLAC3D와의 연계를 통해 지반 및 암반의 탄성거동 뿐만 아니라 탄소성거동 및 크립(creep) 등과 같은 시간 의존적 변형 거동까지 고려함으로써 보다 실제적인 회수생산 과정

의 시뮬레이션이 가능하다. 또한, 본 연구에서는 실무 적용시의 계산효율 제고를 위해 배후(background) 및 병렬 계산 기능을 지원하는 FLAC3D Version 4.0 (Itasca, 2009)와 Fortran 95로 작성된 객체지향형(object-oriented) TOUGH+Hydrate 코드를 연계함으로써 향후 시험생산 등의 현장적용 과정에서의 모델영역 및 해석용량 증가 시에도 효과적으로 활용할 수 있다.

Fig. 3은 TOUGH+Hydrate와 FLAC3D 연계해석 과정을 도식적으로 나타낸다. 먼저 TOUGH+Hydrate 해석을 통해 온도, 유체압력 및 포화도를 계산하고 이를 통해 유효응력 및 열응력을 업데이트한다. 업데이트한 정보를 이용한 FLAC3D 응력-변형율 계산을 통해 공극률 변화를 계산하여 TOUGH+Hydrate 계산을 반복하게 된다. 또한, 포화도의 함수로 체적변형계수, 점착력 등과 같은 강성 및 강도 정수를 수정하고, 공극률 외에도 투과계수, 모세관압 등을 유효응력의 함수로 표시할 수 있다. 전자는 Fig. 3에서 실선으로 표시된 직접연계(direct), 후자는 파선으로 표시된 간접적(indirect) 연계에 해당한다.

3.2 해석모델 및 조건

Fig. 4는 가스하이드레이트 부존 퇴적층에서의 회수 생산을 위한 복수의 수평 생산정 설치조건을 개략적으로 나타낸다. Fig. 4a의 점선으로 표시된 영역이 본 연구의 해석대상에 해당하여, 측면경계는 대칭면에 해당하므로 좌우방향 변위 구속, 바닥면은 강성의 기반암으로 인해 상하방향 변위 구속, 상부면은 자유경계면으로 설정하였다. 해석영역 크기는 10 m x 20 m로 하고 대상영역의 초기조건은 Fig. 4와 같이 설정하였다.

본 연구에서는 감압법을 이용하여 15일 동안 회수 생

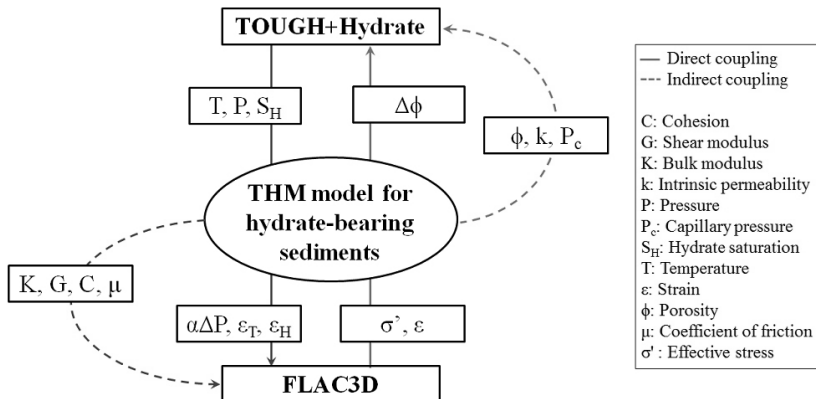
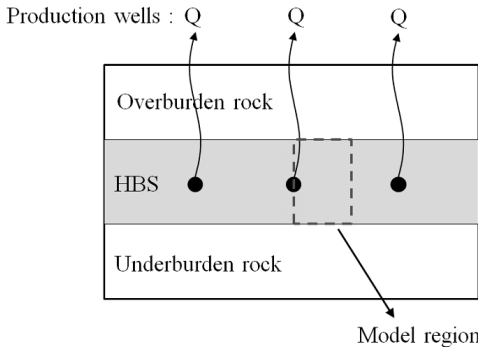
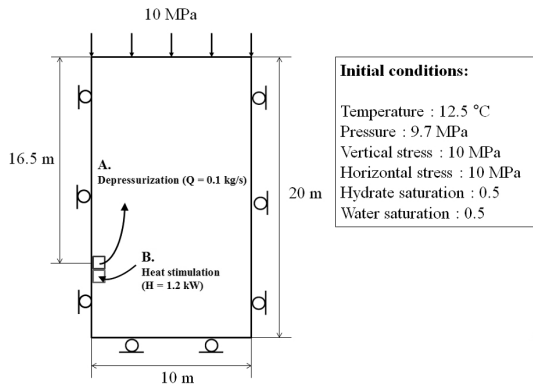


Fig. 3. Concept of coupled analysis of TOUGH+Hydrate and FLAC3D (Rutqvist and Moridis, 2007)



(a) Schematics of gas production using multiple horizontal wells



(b) Model region and initial boundary conditions

Fig. 4. Model region, initial and boundary conditions for the gas production analysis

산하는 과정을 기본해석(base case)으로 하고, 생산방식에 따른 효율 분석 목적으로 감압법과 열자극법을 병행한 해석결과를 비교하였다. 감압을 위한 양수는 Fig. 4a 지점에서 실시하였으며, 열자극은 양수 지점 직하부

(Fig. 4b지점)에서 실시하는 것으로 가정하였다.

가스하이드레이트 해리과정에서 발생하는 퇴적층의 물성변화는 포화도의 함수로 정의된다. 즉, 임의의 포화도에서의 점착력, 체적변형계수, 전단변형계수는 완전포화시의 값($V_{S_H=1}$)과 완전불포화($V_{S_H=0}$) 조건에서의 값을 이용하여 $V_{S_H=0} + (V_{S_H=1} - V_{S_H=0}) \times S_H$ 와 같이 계산하였다. Matsui et al. (2005)에서 보고된 바와 같이, 내부마찰각은 포화도와 무관하게 일정한 것으로 가정하였다.

가스하이드레이트 함유 지층의 역학적 특성이 회수생산시 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 사암과 미고결 점토질 퇴적층의 서로 다른 조건에서의 해석 결과를 비교하였다. 본 연구에서는 Toyoura 사암(Matsui et al., 2005) 및 미고결 점토질 퇴적층(Rutqvist et al., 2007)에 해당하는 입력물성치를 사용하였으며 이는 Table 1과 같다. 초기 가스하이드레이트 포화도 50%에서 사암의 내부마찰각, 점착력, 체적변형계수, 전단변형계수는 각각 30°, 1.25 MPa, 382 MPa, 349 MPa로 계산된다. TOUGH+Hydrate 해석을 위한 제반 입력물성치는 Table 2와 같다. 이는 Moridis et al. (2008)이 제시한 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 일반적인 값으로 회수생산과정에서의 역학적 변형을 주된 관심사로 하는 본 연구에서는 해리과정에서 이들 특성의 변화는 없는 것으로 가정한다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 감압법을 이용한 회수생산 방식

Fig. 5의 실선은 감압법을 이용한 가스하이드레이트 회수생산 과정에서의 생산정 주변 온도, 압력, 포화도, 체적변형계수, 점착력, 유효응력 변화 및 지반변위 발생

Table 1. Geomechanical properties of hydrate-bearing sediments

Parameter	Hydrate saturation	Value ($V_{S_H=0}$ & $V_{S_H=1}$)	
		Base case (sandstone)	Comparison case (unconsolidated clay)
Cohesion (MPa)	$S_H = 0$	0.5	0.125
	$S_H = 1$	2.0	0.5
Friction angle (°)	$S_H = 0$	30	20
	$S_H = 1$	30	20
Bulk modulus (MPa)	$S_H = 0$	95	24
	$S_H = 1$	670	670
Shear Modulus (MPa)	$S_H = 0$	87	22
	$S_H = 1$	612	612

Table 2. Hydraulic and thermal properties of hydrate-bearing sediments

Parameter	Value
Permeability (m ²)	2.96 x 10 ⁻¹³
Porosity (-)	0.3
Grain density (kg/m ³)	2,600
Dry thermal conductivity (W/m/K ^o)	0.5
Wet thermal conductivity (W/m/K ^o)	3.1
Specific heat (J/kg/K ^o)	1,000
Relative permeability model (Moridis et. al., 2008)	$k_{rA} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \left[\frac{S_A - S_{irA}}{1 - S_{irA}} \right]^n, 1 \right\} \right\}$ $k_{rG} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \left[\frac{S_G - S_{irG}}{1 - S_{irA}} \right]^{n_G}, 1 \right\} \right\}$ $k_{rH} = 0$
	$S_{irA} = 0.08$
	$S_{irA} = 0.01$
	$n = 4.0$
	$n_G = 4.0$
Capillary pressure model (van Genuchten, 1980)	$P_{\cap} = -P_0 [(S^*)^{-1/\lambda} - 1]^{1-\lambda}$ $S^* = \frac{(S_A - S_{irA})}{(S_{maxA} - S_{irA})}$ $-P_{max} \leq P_{\cap} \leq 0$
	$\lambda = 1 - 1/n = 0.45$
	$S_{irA} = 0.0049$
	$1/P_0 = 5.0 \times 10^{-4}$
	$P_{max} = 1.0 \times 10^6$
	$S_{maxA} = 1.0$

양상을 나타낸다. 비교를 위해 감압법과 열자극법을 병행한 해석결과를 파선으로 함께 제시하였으나 본 절에서는 감압법만을 적용한 결과에 대해서만 서술한다.

감압을 위한 양수 개시 이후 공극압력은 지속적으로 감소하고, 압력 감소에 의한 해리 발생과 해리과정에서의 흡열반응으로 인해 온도는 0°C까지 감소하고 있다 (Fig. 5a).

감압 개시 약 14일 이후에는 온도 강하에 따라 생산정 주변에 가스하이드레이트 재생성 및 얼음이 형성되는 결과를 볼 수 있다(Fig. 5b). 이들 가스하이드레이트 재생성에 따른 포화도 증가 및 얼음 형성은 주변 퇴적층의 체적변형계수 및 점착력을 증가시키는 효과를 가져와 연성(softening) 강도 및 변형특성에서 경화(hardening)로 전환되는 결과를 보인다. Fig. 5c와 Fig. 5d에서 가스하이드레이트 해리로 인해 포화도가 감소함에 따라 체적변형계수 및 점착력은 점진적으로 감소하다 생산개시 약 14일 이후 하이드레이트 재생성 및 얼음 형성

과 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, Fig. 7e에서 볼 수 있는 바와 같이 이들 고체 하이드레이트 및 얼음은 압력 강하가 현저한 생산정 주변에 국소적으로 집중되어 발생한다. 또한, 생산정 주변 가스하이드레이트 재생성 및 얼음 형성은 주변 지반의 강도 및 강성(stiffness)을 증가시키는 효과와 함께 고체 결정 형성을 통한 공극구조 폐쇄 및 투과특성 감소를 초래하여 감압영역의 확산 지연 및 생산정으로의 해리 가스의 유동을 방해할 수 있음에 주의할 필요가 있다.

감압 과정에서의 압력 감소는 주변 퇴적층의 유효응력 증가를 가져올 뿐만 아니라 최대 및 최소주응력 차이가 점진적으로 증가하여 전단파괴 발생 가능성이 증대된다(Fig. 5e). 이들 유효응력의 증가(특히, 변형이 구속되지 않은 수직방향의 최대유효 압축응력)는 주변 지반 및 상부 암반의 압밀변형과 지반 침하를 발생시키게 되며 본 해석조건에서는 최대 25 cm의 지반 침하가 생산정 직상부에서 발생하는 결과를 보였다(Fig. 5f).

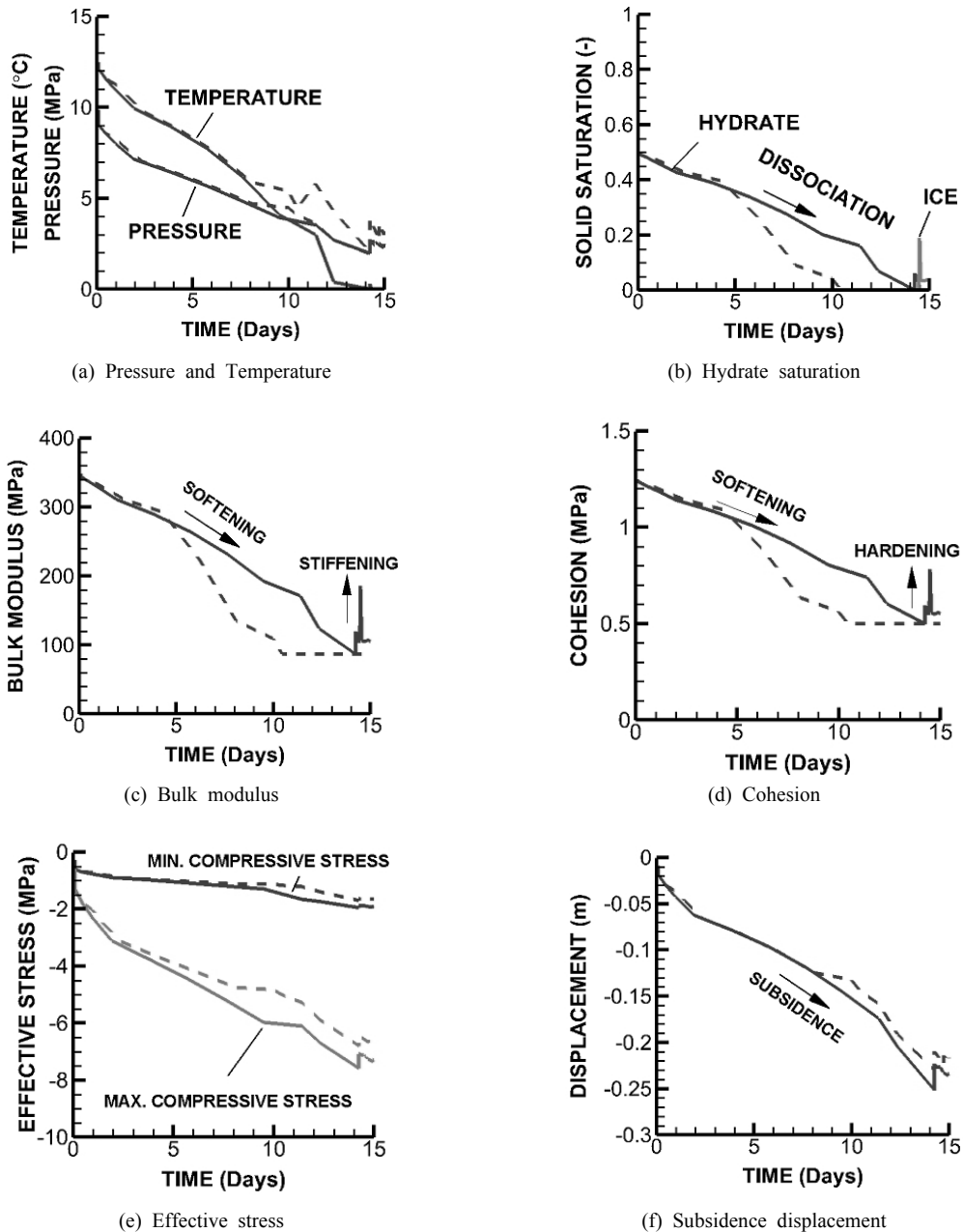
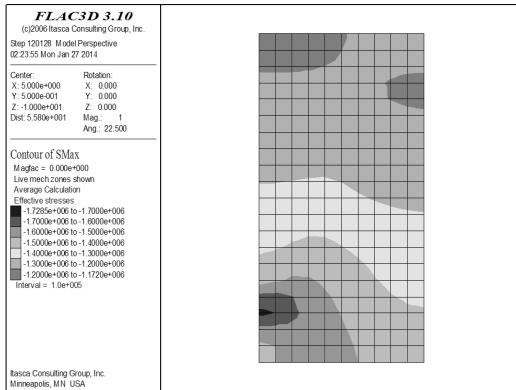


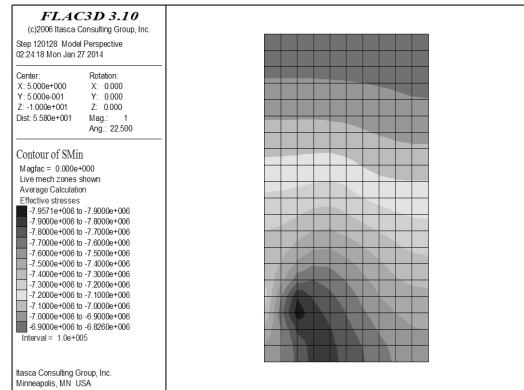
Fig. 5. Time dependent results from the simulation of 15 days of production (solid: depressurization, dashed: depressurization + thermal stimulation)

Fig. 6은 생산개시 1일, 7일, 15일 이후의 공극압력, 온도, 가스하이드레이트 포화도, 체적변형계수, 점착력의 분포 양상을 나타낸 것이다. 압력 및 온도 변화가 현격한 생산정 주변에서 포화도 변화가 현격하고 이에 따른 주변 퇴적층의 점착력(강도) 및 체적변형계수(강성도) 감소

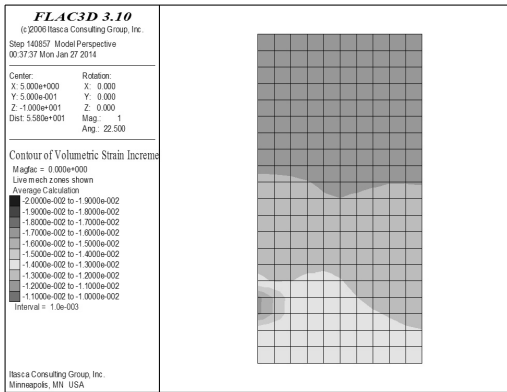
가 집중됨을 알 수 있다. Fig. 7은 생산 개시 15일 이후 최대 및 최소유효주응력, 침하변위, 체적변형률 및 얼음 포화도의 공간 분포를 나타낸 것이다. 생산정 주변에 체적변형률이 집중되는 것과 달리, 지반 침하변위는 퇴적층 내에서 비교적 균등하게 발생하는 결과를 보인다.



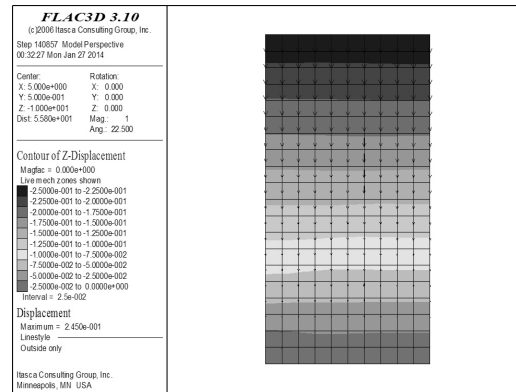
(a) Maximum effective compressive stress



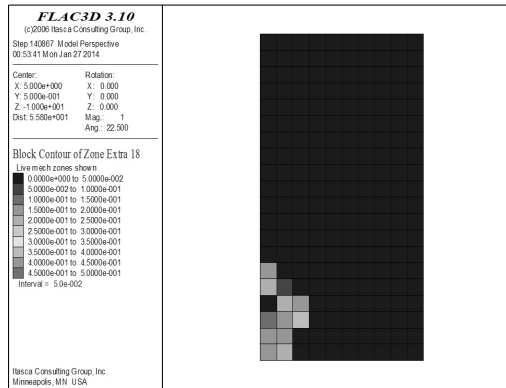
(b) Minimum effective compressive stress



(c) Volumetric strain



(d) Subsidence



(e) Ice saturation

Fig. 7. Spatial distribution of the results from the simulation of 15 days of gas production using depressurization

4.2 감압법과 열자극법을 병행한 회수생산 방식

Fig. 5의 파선은 감압과 함께 열자극법을 병행한 회수 생산 해석결과이다. 감압법만을 적용한 경우, 흡열반응인 가스하이드레이트 해리로 인해 감압개시 약 14일 이

후 감압지점의 온도가 0°C 이하로 감소하고 이로 인해 얼음 고체가 형성됨이 확인된 바 있다(Fig. 5b). 열자극법을 병행할 경우, 해리로 인한 온도 하강이 억제되어 공극 폐쇄 및 가스 유동을 저해하는 얼음 고체 형성이

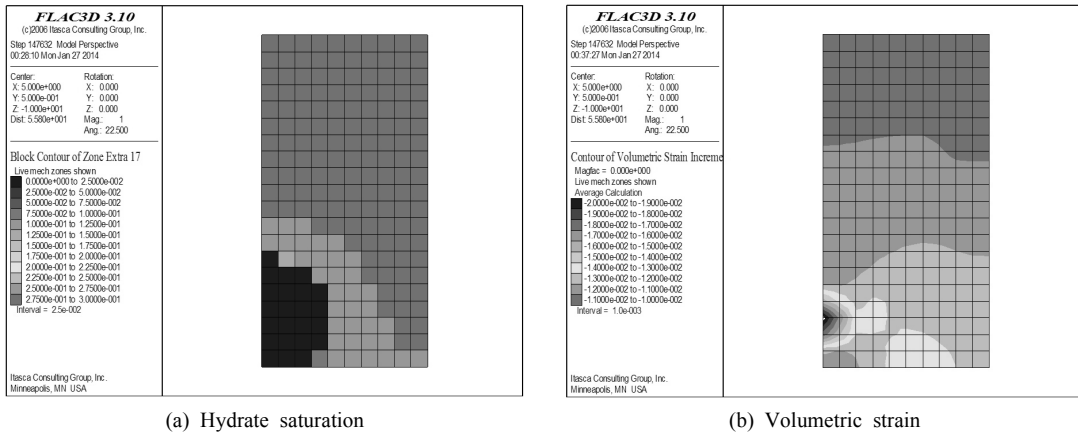


Fig. 8. Spatial distribution of the results from the simulation of 15 days of gas production using both depressurization and thermal stimulation methods

관측되지 않았다(Fig. 5b). 또한, 열공급으로 인한 온도 상승으로 해리 속도가 빨라져 감압개시 약 10일 이후 감압지점 부근의 가스하이드레이트는 완전히 해리됨을 알 수 있다(Fig. 5b).

체적변형계수 및 점착력은 가스하이드레이트 포화도의 함수이기 때문에 해리속도의 증가에 따른 포화도의 조기 감소로 퇴적층의 강성도 및 강도가 조기에 감소하여(Fig. 5c와 Fig. 5d) 유효응력의 감소 (Fig. 5e) 및 상부 지반의 침하량(Fig. 5f)도 감압법을 단독으로 실시하는 경우에 비해 상대적으로 작은 값을 보였다.

Fig. 8은 감압법과 병행하여 15일간 열자극을 병행한 경우의 가스하이드레이트 포화도 및 체적변형을 분포를 나타낸다. 감압법만 실시한 경우에 비해(Fig. 6c) 주변으로의 열전달로 인한 온도 상승으로 해리 영역이 증가함을 알 수 있다(Fig. 8a). 또한, 열공급으로 인한 온도 상승으로 생산정 주변에서의 얼음 고체 형성 및 하이드레이트 재생성을 방지함으로써 해리 가스의 생산정 방향으로의 유동성을 확보하여 생산효율을 향상시킬 수 있다. Fig. 9는 열자극법 병행여부에 따른 누적 가스생산량 추이를 나타낸 것으로 열자극법 적용에 따른 생산효율 향상은 특히 생산 초기에 더욱 두드러지게 나타남으로써 감압법에 의한 회수생산에 소요되는 시간을 단축할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 주변 퇴적층의 역학적 특성이 생산과정에서의 변형에 미치는 영향

사암 내 가스하이드레이트 회수생산에 해당하는 기본 해석과의 비교 목적으로 미고결 점토질 퇴적층 내 가스하이드레이트 회수 생산에 관한 해석을 실시하였다. 미

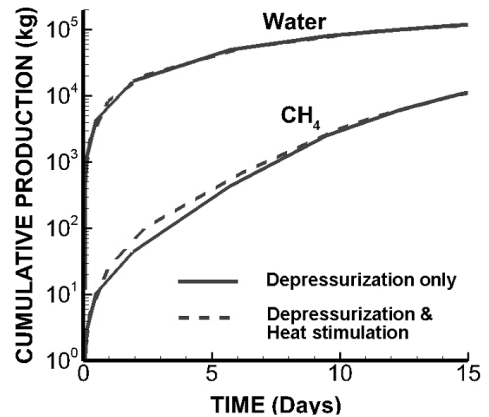


Fig. 9. Comparison of cumulative production rate (kg) of methane gas between depressurization method (solid) and depressurization & thermal stimulation method (dashed)

고결 퇴적층의 경우, 사암에 비해 내부마찰각의 감소, 가스하이드레이트 완전해리($S_H = 0$)시의 강성도 및 강도의 저하로 특징지어진다(Table 1).

Fig. 10은 미고결 점토질 퇴적층에서의 침하변위 및 체적변형을 결과이다. 사암의 경우와 변형 발생양상은 유사하나, 최대침하 변위는 40 cm에 이르고, 사암에 비해 체적변형율의 최대값은 약 200% 증가하는 결과를 보였다. 미고결 점토질 퇴적층의 경우, 사암에 비해 동일한 생산조건에서도 역학적 변형이 과다할 뿐만 아니라, 일반적으로 투과계수가 상대적으로 낮아 감압법에 의한 압력 저감의 영향 영역이 제한되므로 회수생산시의 안전성 설계 및 생산량 예측 평가에 더욱 주의가 필요하다.

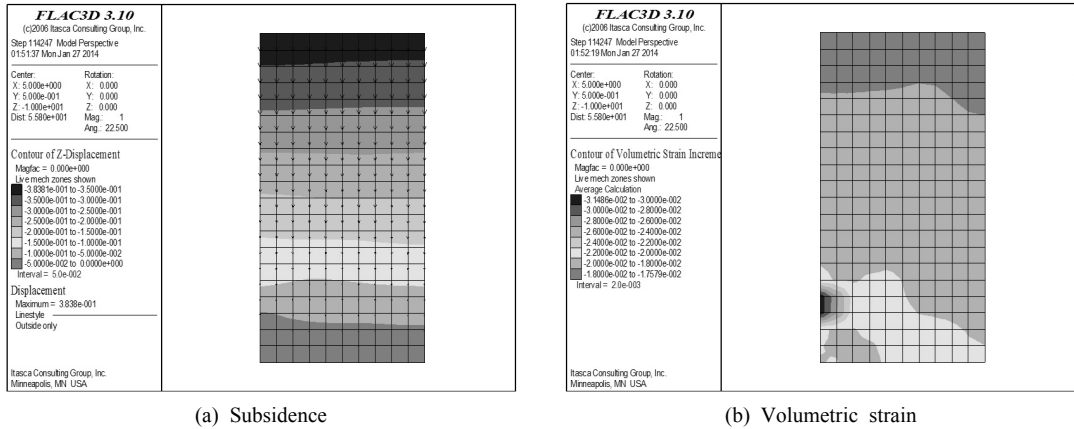


Fig. 10. Spatial distribution of the results from the simulation of 15 days of gas production in unconsolidated clay rocks

5. 결론

가스하이드레이트 회수생산 과정에서 발생가능한 해저지반의 역학적 변형 및 생산 효율에의 영향을 조사할 목적으로 지오메카닉스모델 해석을 실시하였다. 본 연구에서는 TOUGH+Hydrate와 FLAC3D를 연계한 해석을 통해 가스하이드레이트 해리에 따른 온도, 압력, 포화도 변화 및 이에 따른 주변 퇴적층 내 유효응력, 강성 및 강도 변화를 고려한 지오메카닉스 모델해석을 실시하였다.

감압법을 이용한 가스하이드레이트 회수 생산 방식의 기초해석결과, 압력 강하에 따른 해리 발생, 해리 과정에서의 하이드레이트 재생성 및 얼음 형성 등과 같은 현상뿐만 아니라 이들 고체 포화도 변화에 따른 주변 퇴적암반의 강성 및 강도 특성의 변화, 변형 특성을 잘 표현할 수 있음을 확인하였다.

감압법과 열자극법을 병행한 회수생산 방식에서는 열 공급으로 인한 해리 촉진과 생산정 주변의 얼음 고체 형성을 억제하여 초기 생산 효율 향상 효과를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 사암층에 비해 미고결 점토질 퇴적층 내 가스하이드레이트 회수생산 시 변형이 과다하게 발생할 수 있음을 보였다.

본 연구에서 소개한 지오메카닉스 모델은 향후 국내에서도 계획되고 있는 가스하이드레이트의 시험생산 및 상업적 생산을 위한 사전 예측해석에 유용하게 활용 가능할 것으로 기대된다. 또한, 가스하이드레이트 해리와 연동된 주변 퇴적층의 역학적 변형해석을 통해 회수 생산에 따른 해리 발생 영역을 예측하고 해저지반의 장기적 안전성을 확보할 수 있는 최적운영조건을 사전 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 본 해석에 사용되는 가스하이드레이트 퇴적층의 공극률, 포화율 등과 같은 기본 입력물성치는 부존 형태 및 대상지역의 지질학적 특성에 따라 추정값이 달라질 수 있고(Shin et al., 2012), 하이드레이트 해리과정에서 발생하는 이들 퇴적층의 역학적 물성값 변화에 관한 정보는 극히 제한적으로 보고되었다 (Hyodo et al., 2014; Song et al., 2014). 따라서, 이들 입력물성값의 불확실성은 본 해석모델을 이용한 예측결과에 매우 큰 오차를 가져올 수 있으므로, 현장적용에 앞서 다양한 역학적 조건에서 발생하는 가스하이드레이트 회수생산 과정의 실내실험을 통한 이들 변수값의 축적 및 예측치와의 비교 분석을 통한 해석모델의 검증작업이 선행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 2013R1A1A2004605).

Reference

1. 가스하이드레이트 개발사업단, <http://www.gashydrate.or.kr/>, 28 Jan. 2014.
2. 임대희, 김정규, 송재준, 2013, 감압법을 이용한 가스하이드레이트 회수생산시 해저지반 거동예측에 관한 수치해석적 연구, 한국암반공학회 추계 총회 및 학술발표회 논문집, 한국암반공학회, 인하대학교, 2013년 10월, pp. 206-211.
3. Huh, D.G., 2005, Status of gas hydrate research in Korea, J. of the Korean Society for Geosystem Engineering, Vol. 42, No. 3, pp. 206-213.
4. Hyodo, M., Li, Y., Yoneda, J., Nakata, Y., Yoshimoto,

- N., Nishimura, A., 2014, Effects of dissociation on the shear strength and deformation behavior of methane hydrate-bearing sediments, *Marine and Petroleum Geology* 51, pp. 52-62.
5. Itasca, 2002, FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 3.1, Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, pp. 438. 2009.
 6. Itasca, 2009, FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 4.0, Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, pp. 438. 2009.
 7. Kim, H.M., Rutqvist, J., Ryu, D.W., Synn, J.H., Song, W.K., 2011, Geomechanical Stability of Underground Lined Rock Caverns (LRC) for Compressed Air Energy Storage (CAES) using Coupled Thermal-Hydraulic-Mechanical Analysis, Tunnel and Underground Space (J. of the Korean Society for Rock Mechanics), Vol. 21, No. 5, pp. 394-405.
 8. Kwon, T.H., Cho, K.C., 2008, Excess pore pressure generation in gas hydrate-bearing sediments by thermal changes, *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, pp. 937-940.
 9. Lee, J., 2009, The development status and prospect for the production technology of gas hydrate, *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 46, No. 3, pp. 387-401.
 10. Lee, J.Y., Lee, J., Kim S., 2011, Experimental research trends on gas hydrate production, *Proc. of the Korean Society for New and Renewable Energy*, 2011 May, pp. 147-2.
 11. Matsui, A., Haneda, H., Ogata, Y., Aoki, K., 2005, The effect of saturation degree of methane hydrate on the shaer strength of synthetic methane hydrate sediments, *Proceedings of the 5th International Conference on Gas Hydrates*, Trondheim, Norway, pp. 657-663.
 12. Moridis, G.J. Kowalsky, M.B., Pruess, K., 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.
 13. Park, S.S., 2008, A study on submarine slope failure due to gas hydrate dissociation, *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 45, No. 2, pp. 164-173.
 14. Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., TOUGH2 User's Guide Version 2.0, LBNL-43134, 1999.
 15. Rutqvist, J., Moridis, G.J., 2007, Numerical stuides of geomechanical stability of hydrate-bearing sediments, Offshore technology conference, 2007 May, Houston, Texas, U.S.A.
 16. Rutqvist, J., Moridis, G.J., Grover, T., Collett, T., 2009, Geomechanical response of permafrost-associated hydrate deposits to depressurization-induced gas production, *J. Petroleum Science and Engineering*, Vol. 67, pp. 1-12.
 17. Rutqvist, J., Moridis, G.J., Grover, T., Silpnagarmert, S., Collett, T., Holdich, S.A., 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.
 18. Ryu, B.J., Lee, S.R., You, D.G., Kim, G.Y., Chun, J.H., Bahk, J.J., Kim, J.H., Lee, J.Y., 2011, The 2nd Ulleung basin hydrate drilling expedition (UBGH2), *Proc. of the Korean Society for New and Renewable Energy*, 2011 May, pp. 147-1.
 19. Shin, H.J., Lim, J.S., Kim, S.J., 2012, Estimation of porosity and saturation in gas hydrate bearing sediments using well logs and core analysis data of the 2nd wells in Ulleung basin, East Sea, Korea, *J. the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 49, No. 2, pp. 175-185.
 20. Song, Y., Zhu, Y., Liu, W., Zhao, J., Li, Y., Chen, Y., Shen, Z., Lu, Y., Ji, C., 2014, Experimental research on the mechanical properties of methane hydrate-bearing sediments during hydrate dissociation, *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 51, pp. 70-78.
 21. Sung, W., Wang, J.H., Park, J.K., Lee, J.H., Lim J.S., 2009, Hydrate deposit classification based on bottom simulating reflector, *J. of the Korean Society for Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 46, No. 3, pp. 300-309.
 22. 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.

김 형 목



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

Jonny Rutqvist



1988년 Msc., Geotechnlogy, Lulea University of Technology, Sweden
 1990년 Technical Licentiate, Rock Mechanics, Lulea University of Technology, Sweden
 1995년 Ph.D., Engineering Geology, Royal Institute of Technology, Sweden

Tel: +1-510-486-5432
 E-mail: jrutqvist@lbl.gov
 현재 Staff Scientist, Lawrence Berkeley National Laboratory, California, USA