

연구논문

동해 울릉분지 UBGH2-6 하이드레이트 지층 및 포화율 분포 특성을 고려한 시뮬레이션 연구

김영민¹ · 이원석^{2*}¹한국석유공사 글로벌기술센터 저류공학팀 대리, ²한국지질자원연구원 석유해저연구본부 책임연구원

Simulation Study on UBGH2-6 Deposit in the Ulleung Basin Considering Hydrate Bearing Sediments and Saturation Distribution Characteristics

Young Min Kim¹ and Won Suk Lee^{2*}¹Deputy Manager, Reservoir Engineering Team, Global E&P Technology Center, Korea National Oil Corporation, Ulsan, Korea²Principal Researcher, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea***Corresponding Author.** Won Suk Lee, wslee@kigam.re.kr, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea**Received**

13 October 2021

Final version Received

5 January 2022

Accepted

22 February 2022

Abstract

Reservoir simulation models with a heterogeneous distribution of hydrate saturation were built based on the complex geology model of the UBGH2-6 deposit in the Ulleung Basin, Korea. Because of the hydrate production by the depressurization method, 74.6% of the cumulative gas production was produced from a thin layer (less than 0.2 m) with low hydrate saturation. A reservoir simulation was performed to evaluate the effect of hydrate saturation and thin-layer structure on gas production. In the case of homogeneous distribution of hydrate saturation, the gas can be produced from all sand layers because of the increasing effective permeability with decreasing hydrate saturation. Production analysis based on various thin layer structures revealed a decrease in the cumulative gas production by 40% after removal of a thin layer with thickness of 0.1 m from the base model. As the radius of the thin layer increases, the hydrate dissociation front can be propagated more by increasing the influence radius of the bottomhole pressure. Considering the proportion of gas production in the thin layers, a detailed investigation of thin layers as the production target is required to establish a strategy for gas hydrate production in the UBGH2-6 deposit.

Key words : Ulleung basin, Gas hydrate, Depressurization, Hydrate saturation, Thin layer**요약**

본 연구에서는 동해 울릉분지 UBGH2-6의 세부지층모델을 기반으로 불균질 하이드레이트 포화율을 갖는 저류층 기본모델을 구축하였다. 감압법 적용 결과, 누적 가스 생산량의 74.6%가 하이드레이트 포화율이 낮은 박층(0.2 m 이하)에 편중되었다. 하이드레이트 포화율과 박층 구조가 가스 생산에 미치는 영향을 분석하기 위해 저류층 시뮬레이션을 수행하였다. 하이드레이트 포화율이 균질한 모델에서는 포화율이 감소함에 따라 유효 투과도가 증가하여 모든 사질에서 가스 생산이 발생하였다. 다양한 박층 분포 시나리오에 따른 분석 결과, 두께가 0.1 m인 박층을 기본모델에서 삭제하면 누적 가스 생산량이 40%까지 감소하였으며, 박층의 분포범위가 길어질수록 공저압 영향반경을 증가시켜 하이드레이트 해리면 전파가 확장되었다. 박층에서의 가스생산량 비중을 고려하였을 때,

UBGH2-6 가스하이드레이트 생산 전략 수립에 있어 생산 목표층으로의 박층에 대한 보다 세밀한 규명이 필요함을 알 수 있다.

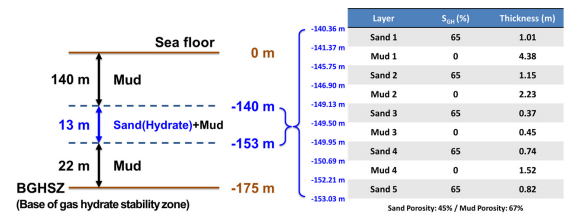
주요어: 올릉분지, 가스하이드레이트, 감압법, 하이드레이트 포화율, 박층

서론

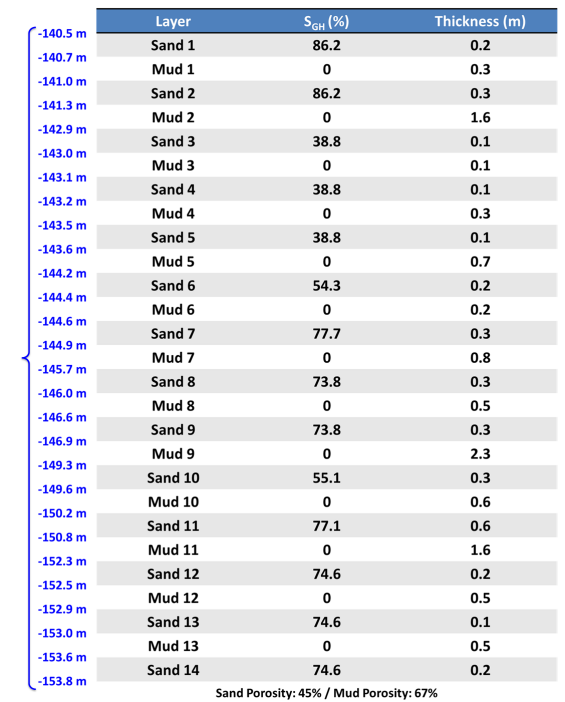
가스하이드레이트는 증가하는 에너지 수요를 충족시키기 위해 대규모로 천연가스를 공급할 수 있는 잠재력을 지닌 비전통가스 자원이다. 전세계 하이드레이트 부존량의 97%가 해양 환경에서 발견되고 있는 가운데 국내의 동해 올릉분지에서도 가스하이드레이트 부존 유망 구조 5곳을 선정한 바 있다(Park, 2008). 가스하이드레이트 사업단은 올릉분지에서 가스하이드레이트 현물 채취와 부존량 평가, 시험생산 지점 선정을 위해 2007년과 2010년에 심부시추를 실시하였다. 2010년에 이루어진 2차 심부시추에서는 13개 지점에서 LWD(logging-while-drilling) 및MWD(measurement- while-drilling)를 진행하였으며, 10개 지점에서 코어 샘플을 채취하였다. 2차 심부시추 지역에 대한 지질모델, 탄성과 분석, 검층 및 코어 자료 등을 종합하여 동해 올릉분지(UBGH2-6)를 시험생산 위치로 결정하였다(Huh and Lee, 2017). 한국지질자원연구원을 포함하여 다수의 기관에서 UBGH2-6 내 가스하이드레이트 저류층에서의 시험생산을 위한 연구를 수행해 오고 있다. Moridis *et al.* (2014)은 로렌스버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)에서 개발한 TOUGH+HYDRATE를 이용하여 투과도에 따른 가스하이드레이트 생산 추이를 분석하였으며, 공저압에 따른 지반 침하 시뮬레이션을 수행하였다. Shin *et al.*(2015)은 감압법 적용시 공저압과 수직/수평투과도 비에 따른 하이드레이트 해리 유동 특성 및 유체 생산량 변화를 분석하였다. Moon *et al.*(2019)은 TOUGH+HYDRATE와 FLAC 3D 시뮬레이터를 이용하여 공저압과 감압속도가 지반 안정성에 미치는 영향을 파악하였다. 선행연구들에서는 Fig. 1(a)와 같이 하이드레이트 분포 지층(hydrate-bearing sediments, HBS)이 5개의 사질층(sand layer)과 4개의 머드층(mud layer)이 교호된 형태의 지질 모델을 활용하였다. Fig. 1에서 심도는 해저면을 기준으로 계산한 것으로 하이드레이트를 포함한 사질층은 해저면 기준 -140 m부터 -153 m 사이에 분포한다. 해당 모델에서 사질층 두께는 0.37~1.15 m 범위를 보이며, 하이드레이트 포화율은 모든 층에서 65%로 균일하게 설정하였다.

2019년 한국지질자원연구원에서는 기존 시추 및 물리검층 자료를 바탕으로 UBGH2-6 시추 지점에서의 가스하이드레이트 사질층 분포 모델을 Fig. 1(b)와 같이 개선하였다

(KIGAM, 2019). HBS 구간에서의 비저항 검층 결과와 시추코어 분석자료를 비교함으로써 하이드레이트 분포 모델을 도출하였다. 시추코어에서는 두께가 0.6 m 이상인 하이드레이트가 관측되지 않았기 때문에 비저항 검층에서 사질층의 두께가 0.6 m 이상인 경우에는 사질층과 머드층이 교호한 것으로 해석하여 모델을 개선하였다. Fig. 1(b)의 분포 모델에서와 같이 HBS 내 사질층과 머드층은 각각 14개, 13개로 세분화되었으며 이에 따라 사질층의 두께도 최소 0.1



(a) Simple Model



(b) Complex Model

Fig. 1. Geology and Stratification at UBGH2-6 deposit.

m로 얇은 박층으로 구성된 것으로 확인되었다.

가스 생산 잠재력에 대한 지질학적 조건의 영향을 분석하는 것은 하이드레이트 저류층의 시험생산을 위해 매우 중요한 사항이다. 하이드레이트 해리 및 가스 생산에 영향을 미칠 수 있는 지질학적 영향인자에는 공극률, 투과도, 하이드레이트 포화율, 저류층 두께, 초기 압력 및 온도 등이 있다(Kurihara *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2016). Huang *et al.*(2016)은 6개의 지질학적 변수가 감압법 적용시 하이드레이트 해리, 누적 가스 및 물 생산량, 물-가스 생산비(water-to-gas ratio) 등에 미치는 영향이 크다는 것을 밝혔다. 동해 울릉분지 UBGH2-6의 공극률, 투과도, 초기 압력 및 온도는 LWD, 코어분석, CTD (conductivity, temperature, depth) 장비 등을 통해 분석된 것으로서, 이들 변수에 대한 불확실성은 낮다고 판단된다. UBGH2-6의 단순지층모델을 기반으로 한 선행연구들에서도 공극률, 투과도, 초기 압력 및 온도는 모두 동일하게 적용되었다.

단순지층모델과 달리 세부지층모델에서 개선된 사항은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 초기 하이드레이트 포화율이 최소 38.8%에서 최대 86.2%까지 각 사질층별로 다르게 분포하는 것이 특징이다. 본 연구에서는 각 층의 하이드레이트 포화도는 균질하지만, 층별로는 불균질 분포를 보이는 특징을 하이드레이트 포화도의 수직적 불균질성으로 정의하였다. Zheng *et al.*(2018)과 Tomasini and Stephen(2020)은 각각 1D 코어모델과 우루과이 해저 하이드레이트 저류층 모델을 대상으로 초기 하이드레이트 포화율이 해리면(dissociation front) 전파와 가스 생산량에 미치는 영향을 분석하였다. 이들 연구에서는 하이드레이트 포화율이 70~80%로 높은 수준에서는 유효 투과도가 감소하여 감압법에 의한 하이드레이트 생산이 거의 발생하지 않았다. 따라서 하이드레이트의 한계 포화율(critical gas hydrate saturation)이 70~80% 범위에서 존재한다고 밝혔다. UBGH2-6에서는 14개 사질층 중 9개가 70% 이상의 초기 하이드레이트 포화율을 보인다. 각 사질층에서 발생하는 하이드레이트 해리면 전파 및 가스 생산량을 분석함으로써 UBGH2-6의 한계 하이드레이트 포화율과 각 사질층의 생산 기여도를 파악하는 것이 필요하다. 또한 하이드레이트 포화율을 65%로 균질하게 설정한 선행연구들과 같이 세부지층모델에서도 평균 포화도로 반영했을 때의 가스 생산 특성을 분석하면 하이드레이트 포화율 분포 조건에 따른 영향을 확인할 수 있다.

세부지층모델의 두 번째 개선사항은 가스하이드레이트를 포함하는 사질층의 수가 14개로 증가하면서 각 사질층의 두께가 최소 0.1 m로 감소한 것이다. 저류층 시뮬레이션에서는 박층까지 모사해야 하기 때문에 최소 격자크기가 0.1 m까지 세분화되어야 하며, 이에 따라 층 격자수가 증가

하면서 시뮬레이션 시간과 비용이 많이 소요된다. 박층의 경우, 공저 인근에서만 분포하거나 불연속 구간을 포함할 가능성을 배제하기 어렵다. 총 하이드레이트 부존량에서 0.1 m의 박층이 차지하는 부분은 8.2% 정도이다. 부존량은 상대적으로 낮으나, 하이드레이트 생산 측면에서 다양한 박층 분포 시나리오에 따라 하이드레이트 해리 및 가스 생산 영향을 분석할 필요가 있다. 이를 통해 가스하이드레이트 생산 시뮬레이션을 위한 저류층 모델 및 격자 구성방안에 대해서도 검토할 수 있다.

이에 본 연구에서는 UBGH2-6의 최신 세부지층모델을 기반으로 하이드레이트 저류층 기본모델을 구축하여 감압법 적용에 가스 생산량을 분석하고자 한다. 또한 하이드레이트 포화율 및 사질층 분포에 따른 저류층 구조 시나리오를 설정하고, 감압법을 적용하여 하이드레이트 해리면 전파 및 사질층별 생산 기여도를 파악하고자 한다. 이를 통해 UBGH2-6의 저류층 구조 불확실성에 따른 가스 생산 영향을 파악하고 가스하이드레이트 중장기 생산 시뮬레이션 계획 수립에 필요한 정보를 수집하고자 한다.

울릉분지 하이드레이트 저류층 기본모델 구축

본 연구에서는 TOUGH+HYDRATE를 이용하여 UBGH2-6 가스하이드레이트 저류층 시뮬레이션을 수행하였다. TOUGH+HYDRATE는 가스하이드레이트 저류층 내 유체 및 열 유동, 유체 상거동, 열역학적 변화, 하이드레이트 형성 및 해리 반응 등을 모사할 수 있는 것이 특징이다. 특히 TOUGH+HYDRATE는 감압법, 열 자극법, 억제제 주입법을 적용하여 가스하이드레이트 해리 시뮬레이션을 수행할 수 있고, 해양 퇴적층 및 영구 동토층 등 모든 가스하이드레이트 저류층을 대상으로 적용할 수 있다.

UBGH2-6 단순지층모델을 통한 입력자료 타당성 검토

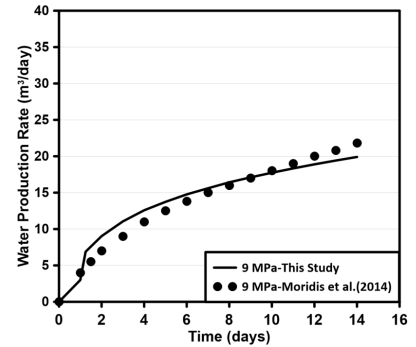
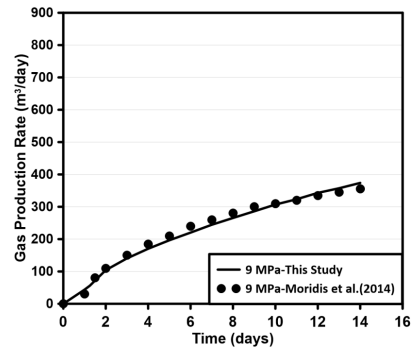
저류층 시뮬레이션 입력자료 및 결과의 신뢰성을 확보하고자 TOUGH+HYDRATE 개발기관의 선행연구(Moridis *et al.*, 2014)와 유사한 저류층 모델을 구축하여 유체 생산 결과를 비교하였다. 선행연구와의 비교를 위한 저류층 모델은 Fig. 1(a)과 같이 12.7 m의 HBS를 갖는 단순지층모델을 기반으로 구축하였으며, 상부 머드층(overburden mud layer)과 하부 머드층(underburden mud layer)의 두께는 각각 140 m, 300 m로 설정하였다. HBS 내 5개의 사질층에만 하이드레이트가 부존되어 있으며, 하이드레이트 포화율은 모든 사질층에서 65%로 균질한 것이 특징이다.

UBGH2-6의 TOUGH+HYDRATE 모델에 적용된 저류층 물성은 Table 1과 같다. 수심 2,157 m 해저면에서의 압력과 온도는 각각 22.261 MPa과 0.482°C이며, 심도에 따

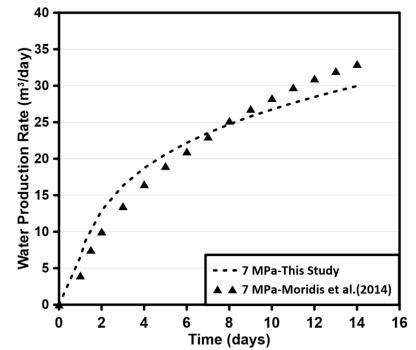
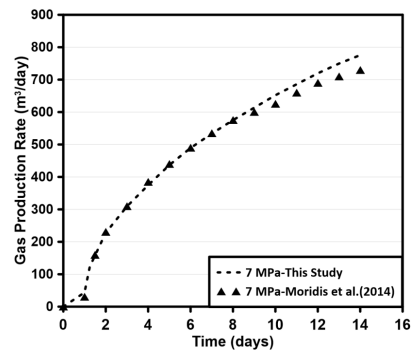
Table 1. Reservoir properties of UBGH2-6 deposit

Parameter	Value	
Initial pressure at sea floor, MPa	22.261	
Initial temperature at sea floor, °C	0.482	
Temperature gradient, °C/km	112	
Gas composition	CH ₄ 100%	
Salinity of formation water, wt%	3.45	
Hydrate saturation (sand layer), fraction	0.65	
Porosity, fraction	Overburden	0.69
	Underburden	0.63
	Mud	0.67
Permeability, m ² (md)	Sand	0.45
	Overburden	2.00e-18 (0.002)
	Underburden	2.00e-19 (0.0002)
Density, kg/m ³	Mud	2.00e-16 (0.2)
	Sand	1.78e-13 (178)
	Overburden	2,620
Dry thermal conductivity, W/m/K	Underburden	2,660
	Mud	2,640
	Sand	2,650
Wet thermal conductivity, W/m/K	Mud	1
	Sand	1.45

른 온도 구배는 약 112 °C/km로 측정되었다(Ryu *et al.*, 2012; Ryu *et al.*, 2013). LWD와 코어 분석을 통해 확인된 사질층의 공극률은 45%이며, 사질층 사이에 존재하는 머드층은 67%이다. 투과도의 경우, 사질층은 180 md인 반면 머드층은 0.2 md로 낮은 투과도를 갖는다. 저류층 내 가스는 CH₄ 100%로 이루어져 있으며, 물의 염도는 샘플 분석결과에 따라 3.45 wt%로 설정하였다. 초기 사질층에는 하이드레이트와 물이 포화되어 있으며, 감압법 적용에 따라 하이드레이트가 해리되며 가스-물 유동이 발생하게 된다. 열전도도는 지층이 유체로 완전 포화된 조건(wet)과 포화되지 않은 조건(dry)으로 구분하여 입력자료를 구성하였다. Moridis *et al.*(2014)에서는 UBGH2-6과 유사한 구조를 갖는 저류층의 상대투과도와 모세관압 자료를 활용하여 다상 유동을 모사하였다. 여기서, 상대투과도에는 modified Stone (1970) 모델을 적용하였고 모세관압은 van-Genuchten (1980) 모델을 사용하였다. 이와 같이 단순지층모델 기반으로 저류층 모델 구축 시 Moridis *et al.*(2014)에서 제공한 물성을 최대한 활용하였다. 그럼에도 불구하고 하이드레이트 포화율에 따른 투과도 감퇴지수(permeability reduction factor),



(a) Bottomhole Pressure 9 MPa



(b) Bottomhole Pressure 7 MPa

Fig. 2. Production data comparison with Moridis *et al.* (2014): gas production rate (left), water production rate (right).

지층 비열(specific heat) 등에 대해서는 정보가 제공되지 않았다. 일반적으로 투과도 감퇴지수는 2~15 범위에 분포하며, 사질층의 비열은 800~1,500 J/kg/°C의 범위를 갖는다. 가스 생산량 추이가 유사한 결과가 취득될 수 있도록 각 변수의 적정범위 내에서 입력값을 가정하였으며, 그 결과 투과도 감퇴지수는 6.5, 사질층의 비열은 1,000 J/kg/°C로 확인되었다.

14일 동안 감압법 시뮬레이션을 수행하여 하이드레이트 저류층으로부터 가스 및 물 생산량을 취득하였다. 감압법을 위한 최저 공저압을 7 MPa, 9 MPa로 설정하였으며, 감압속도는 0.5 MPa/h로 적용하였다. Fig. 2는 단순지층모델 기반의 저류층에서 취득한 유체 생산량을 Moridis *et al.*(2014)과 비교한 것이다. 공저압이 9 MPa인 경우, 14일 시점에서 단순지층모델 기반의 저류층의 가스 생산량은 374 m³/day이고 물 생산량은 약 20 m³/day이다. 공저압이 하이드레이트 평형압력보다 낮아질 때까지 하이드레이트 해리가 발생하지 않아 가스 생산이 느리게 발생하였다. 공저압이 9 MPa에 도달하는 1.17일부터는 가스 생산량이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(a)와 같이 전체적인 가스 물 생산량 추이는 Moridis *et al.*(2014)과 유사하게 나타났다. Moridis *et al.*(2014)의 결과를 기준으로 공저압 9 MPa 모델에서는 가스 생산량의 차이가 최소 1%에서 최대 8.2%로 산출되었으며, 물 생산량은 최대 22.7%의 차이를 나타내었다. 가스 생산량에 비해 물 생산량의 차이가 증가한 것은 유체의 유효 투과도를 변화시킬 수 있는 투과도 감퇴지수의 영향으로 판단된다. 생산개시 후 1.33일에 걸쳐 공저압이 7 MPa로 감소하면 저류층 조건에서 하이드레이트 평형 압력보다 공저압이 더 낮아지기 때문에 하이드레이트가 더 많이 해리될 수 있다. 이에 따라 Fig. 2(b)와 같이 가스 및 물

생산량이 증가하는 것을 확인하였다. 7 MPa의 공저압 모델에서도 생산초기 공저압 강하에 따른 유체 생산량 변화와 전체적인 생산 추이가 Moridis *et al.*(2014)와 유사하다. 가스 생산량과 물 생산량은 각각 0.02~6.2%, 1.9~20.7%의 차이를 보인다. 단순지층모델을 활용한 저류층 모델은 Moridis *et al.*(2014)와 최대한 유사하게 구축하였으며, 공저압 변화에 따른 가스 및 물 생산량도 유사하게 도출되었다.

UBGH2-6 기본모델 구축 및 생산자료 분석

Fig. 3은 세부지층모델을 기반으로 구성한 UBGH2-6 가스하이드레이트 저류층 모델의 개략도를 나타낸 것으로, HBS는 해저면 기준 -140.5 m에서 -153.8 m 구간에서 확인되었다. 13.3 m 두께의 HBS 위쪽에는 140.5 m 두께의 상부 머드층이 있으며, 아래쪽에도 저투과성의 하부 머드층이 존재한다. UBGH2-6의 초기 하이드레이트 포화율 분포는 Fig. 3의 오른쪽 그림과 같다. HBS는 사질층과 머드층이 교차하는 형태로 가스하이드레이트는 사질층에만 부존되어 있다. 사질층은 총 14개의 층으로 구성되며, 층 두께는 0.1~0.6 m 정도로 박층인 것이 특징이다. 사질층은 GHS (gas hydrate bearing sand) 1번층(최상부)부터 14번층(최하부)으로 명명하였다. UBGH2-6의 TOUGH+HYDRATE 모델은 정확한 하이드레이트 해리 및 가스 유동 모사를 위해 저류층 반경인 r-방향으로는 150개, 저류층 심도인 z-방향으로는 96개인 원통형 격자(총 14,400개) 시스템으로 구성하였다. 얇은 사질층이 수직적으로 다수 분포하고 있기 때문에 13.3 m의 HBS 구간에서 z-방향의 격자 크기는 0.1~0.3 m로 세분화하였다. 상하부 머드층에서는 HBS에서 경계면까지 0.1 m부터 대수적으로 격자 높이가 커지도록 설정하였다. 원통형 격자의 r-방향 길이는 250 m로 층분

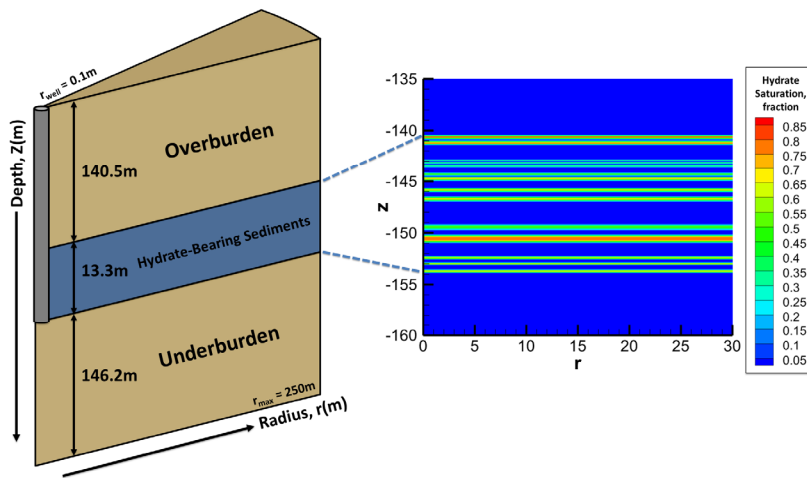


Fig. 3. Schematic diagram of the cylindrical system (left), initial hydrate saturation distribution (right) of UBGH2-6 deposit.

히 길게 설정하였으며, 중심부에서의 격자길이 0.05 m에서 점점 증가하도록 하였다. 모델의 중심축에는 0.1 m 직경의 생산정이 위치하며 HBS 구간만 천공된 것으로 설정하였다. 경계조건인 경우, r-방향으로 250 m에는 비유동성 경계(no-flow boundary)로 적용하였으며 z-방향으로 0 m와 300 m에는 일정온도 경계(constant-temperature boundary)로 설정하였다.

저류층 초기압력과 온도, 공극률, 투과도, 지층 열물성 등은 Table 1의 물성을 기반으로 적용하였다. 심도에 따른 온도를 분석했을 때 UGBH2-6 모델의 최하부에서의 초기온도는 34.08°C로 추정된다. 정수압 방식으로 지층수 염도를 고려하여 HBS 구간에서의 압력을 추정하면 약 23.6 MPa 내외이다. 하이드레이트 평형조건(hydrate equilibrium

Table 2. Reservoir and fluid properties of the base model

Parameter	Value
Overburden thickness, m	140.5
Underburden thickness, m	146.2
HBS thickness, m	13.3
Hydrate saturation (sand layer), fraction	0.388~0.862
Relative permeability model (van-Genuchten)	$k_{rA} = \sqrt{S^*} \{1 - (1 - [S^*]^{1/\lambda})^\lambda\}^2$ $k_{rA} = \sqrt{1 - S^*} \{[1 - (S^*)^{1/\lambda}]^\lambda\}^2$ $S^* = \frac{S_A - S_{irA}}{S_{mA} - S_{irA}}$
Irreducible water saturation (S_{irA})	0.1
Muds	0.1
Sand	0.1
Irreducible gas saturation (S_{irG})	0.01
Muds	0.01
Sand	0.01
λ	0.75
Muds	0.75
Sand	0.66
Capillary pressure model (van-Genuchten)	$P_{cap} = -P_0 [(S^*)^{-1/\lambda} - 1]^{-\lambda}$ $S^* = \frac{(S_A - S_{irA})}{(S_{mA} - S_{irA})}$
λ	0.75
Muds	0.75
Sand	0.66
P_0 , MPa	0.02
Muds	0.02
Sand	0.01
Well radius, m	0.1
Bottomhole pressure, MPa	9
Depressurization rate, MPa/h	0.5
Production periods, days	365

condition)과 비교했을 때, 저류층 압력과 온도조건에서는 하이드레이트 형성영역(hydrate formation region)에 위치하여 열역학적으로 안정한 상태이다. 시추공 비저항 검증 결과, 세부지층모델의 하이드레이트 포화율은 최소 38.8%에서 최대 86.2%로 평균 하이드레이트 포화율은 70.7%이다. UBGH2-6의 기본모델에서 상대투과도 및 모세관압은 van-Genuchten 모델을 통해 적용하였다. Table 2와 같이 van-Genuchten 모델에 적용된 유체 포화율 및 각종 지수들은 KIGAM(2019)에서 취득하였다. 하이드레이트 포화율에 따른 절대투과도(k_r) 변화는 Masuda *et al.*(1997)의 모델을 통해 반영하였다. 식 (1)에서 하이드레이트 포화율(S_h)이 증가함에 따라 절대투과도가 감소하는 특징을 나타낸 것으로 이때 투과도 감퇴지수(N)는 감퇴곡률을 의미한다. 본 연구에서는 코어 실험결과를 바탕으로 감퇴지수를 10으로 설정하였다(KIGAM, 2019).

$$k_r = (1 - S_h)^N \quad (1)$$

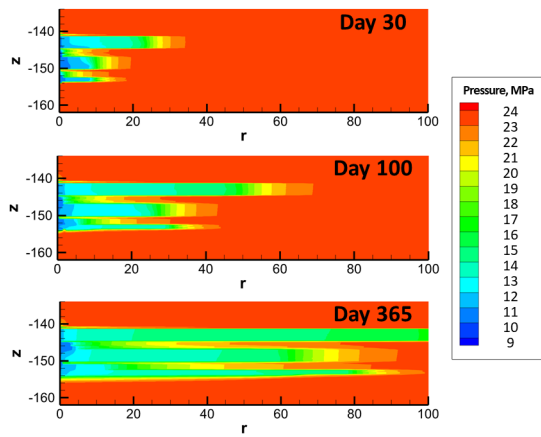
UBGH2-6의 하이드레이트 분포 특징을 기반으로 저류층을 분류해보면 Class 3 타입의 퇴적형태가 지배적인 구조이다. Class 3 타입은 셰일과 같은 저투과층들 사이에 하이드레이트 분포층(hydrate-bearing layer, HBL)이 존재하는 형태로서, UBGH2-6과 같이 사질층과 머드층이 교호한 퇴적층이 대표적인 예이다(Moridis and Collett, 2003; Lee *et al.*, 2011). 감압법은 정압(constant pressure) 생산방식의 특성상 기술적 안정성이 높고 압력전파에 의한 하이드레이트 해리반응이 빠르기 때문에 Class 3 타입의 가스하이드레이트 저류층에서 가장 효율적인 생산방법으로 알려져 있다(Moridis and Reagan, 2007; Moridis *et al.*, 2014). 이에 본 연구에서는 감압법을 UBGH2-6 저류층의 생산방법으로 채택하였다. Kim *et al.*(2018)은 자체 개발한 시뮬레이션을 통해 UBGH2-6을 대상으로 공저압(5, 9, 14 MPa)에 따른 시추공 안정성을 분석한 바 있다. 시추공 안정성은 케이싱의 항복응력(yield stress) 초과여부를 통해 확인하였다. 14일의 단기 생산에서 공저압이 9 MPa일 때, 지반침하로 인해 9 5/8" 케이싱에 가해지는 압축응력이 항복응력보다 낮아 가스 생산 대비 안정적인 수준으로 판단하였다. 반면에 공저압이 5 MPa로 감소하면 압축응력이 빠르게 증가하여 케이싱이 손상될 가능성이 매우 높아졌다. Kim *et al.*(2018)의 연구 결과를 고려하여 감압법을 위한 최저 공저압은 9 MPa으로 설정하였다. 가스하이드레이트 저류층 압력에서부터 공저압 설정값까지의 감압속도는 0.5 MPa/hr로 적용하였다.

9 MPa의 공저압을 1년간 적용하였을 때, 가스하이드레이트 저류층에서 발생하는 해리 반응 및 유체 유동 특성에

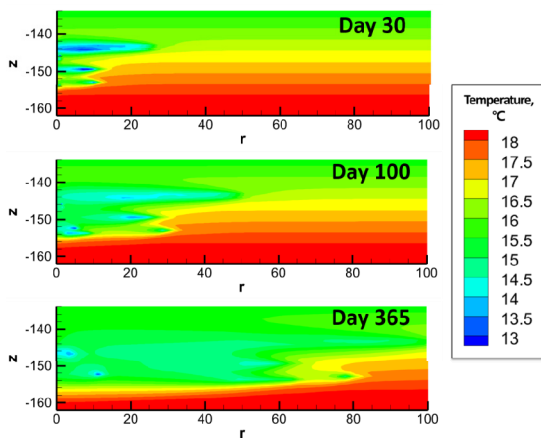
대해 분석하였다. Fig. 4-5는 감압법 적용기간에 따른 가스 하이드레이트 저류층의 압력, 온도, 하이드레이트 포화율, 가스 포화율 변화를 도시한 것이다. Fig. 4(a)와 같이 9 MPa의 공저압이 적용됨에 따라 공저부근부터 압력전파가 시작되는 것을 알 수 있다. 압력이 전파되는 과정에서 저류층 압력이 하이드레이트 평형압력보다 낮아지면서 하이드레이트 해리 조건에 도달하게 된다. 하이드레이트 해리는 흡열 반응이기 때문에 공저인근의 저류층 온도가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 5(a)와 같이 하이드레이트 해리면이 점차 확대됨에 따라 하이드레이트 포화율이 감소하고 가스 포화율은 증가한다. 사질층별로 분석해보면 하이드레이트 포화율이 낮은 GHS 3~5번층에서 하이드레이트 해리 및 가스 생산이 먼저 이루어졌다. 동일한 포화율을 갖는 GHS

12~14번층의 경우, 사질층 두께가 얇은 GHS 13번층이 우선적으로 해리되는 것을 확인하였다.

시간에 따른 UBGH2-6의 가스 및 물 생산량은 Fig. 6과 같다. 생산개시 후 215일까지 가스 생산량이 꾸준히 증가하여 1,150 m³/day에 도달하였다. 생산 초기에는 가스 생산량의 기울기가 빠르게 증가하였으나 50일 생산 시점부터 점차 느려지는 추세를 보인다. 이는 하이드레이트 해리가 HBS 전체에 걸쳐 발생하기 시작하면서 먼저 해리되던 GHS 3~5번, 13번층의 압력전파가 느려진 것이 원인으로 분석되었다. 저류층 초기조건에서 자유가스가 존재하지 않는 것으로 가정하였기 때문에 모든 가스 생산량은 하이드레이트 해리에 의해 발생된 것이다. 저류층 압력 및 온도에 따라 하이드레이트 해리량이 변화할 수 있기 때문에 가

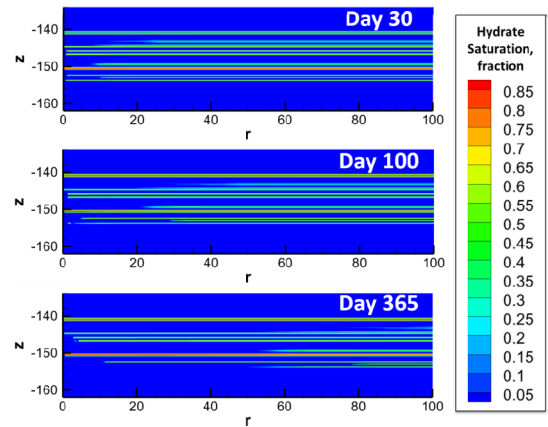


(a) Pressure

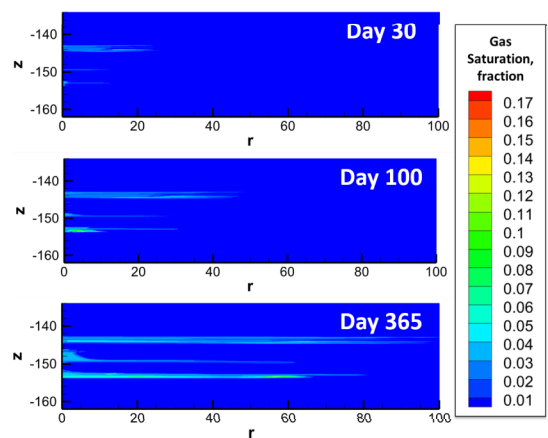


(b) Temperature

Fig. 4. Pressure and temperature distributions on the r-z plane during 365-day production test.



(a) Hydrate saturation



(b) Gas saturation

Fig. 5. Hydrate saturation and gas saturation distributions on the r-z plane during 365-day production test.

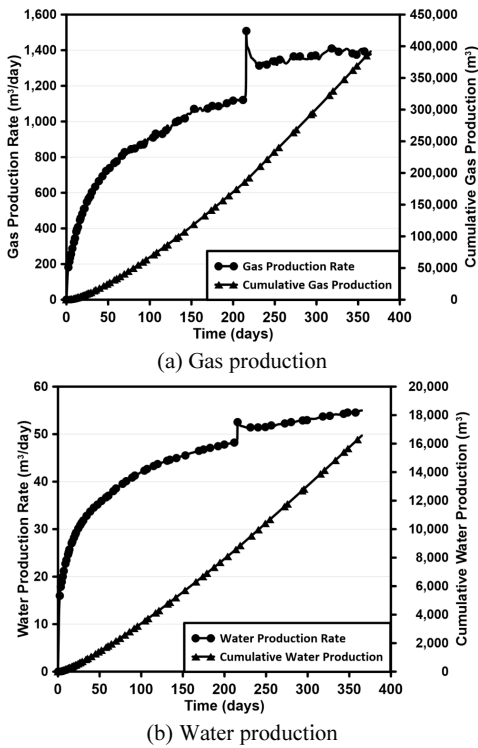


Fig. 6. Gas and water production over time during 365-day production test.

스 생산량이 오르내리는 현상이 관찰되었다.

215일에 도달했을 때, 가스 생산량이 1,508 m³/day까지 급격히 증가하였다. Fig. 7은 160일, 200일, 230일 시점에서의 하이드레이트 포화율 및 온도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7(b)의 온도 분포에서 확인할 수 있듯이 GHS 12~14번 층에서 하이드레이트 해리가 발생하면서 흡열반응으로 인해 온도가 감소한다. 160일과 200일 시점에서의 온도분포를 보면 주변 GHS에서 발생한 흡열반응의 영향이 GHS 14번층까지 영향을 미치면서 공저인근의 온도가 14°C까지 감소하였다. 이로 인해 160일 기준으로 GHS 14번층의 하이드레이트 해리면은 10 m까지 전파되었음에도 불구하고, Fig. 7(a)에 원으로 표시된 것과 같이 공저로부터 2 m 부근에 하이드레이트가 존재한다. 이는 GHS 14번층의 공저인근에서는 흡열반응으로 인해 해리조건에 도달하지 못하고 일부 하이드레이트가 잔류된 것으로 판단된다. 하이드레이트가 존재하는 곳에서는 포화율에 따라 유체 유효 투과도가 감소하기 때문에 하이드레이트 해리에 의해 발생한 gas와 물이 제대로 생산되지 못하고 정체되어 있던 것이다. 생산개시 215일 이후에는 공저인근에 잔류된 하이드레이트가 완전히 해리되고 정체되어 있던 유체가 생산되면서 가스 생산량이 급격히 증가하였다. 가스 생산량이 증가하는 시점에서 Fig. 6(b)의 물 생산량도 함께 증가하는 경향을 보였다. 14번층에 정체되어 있던 물이 생산됨에 따라 215

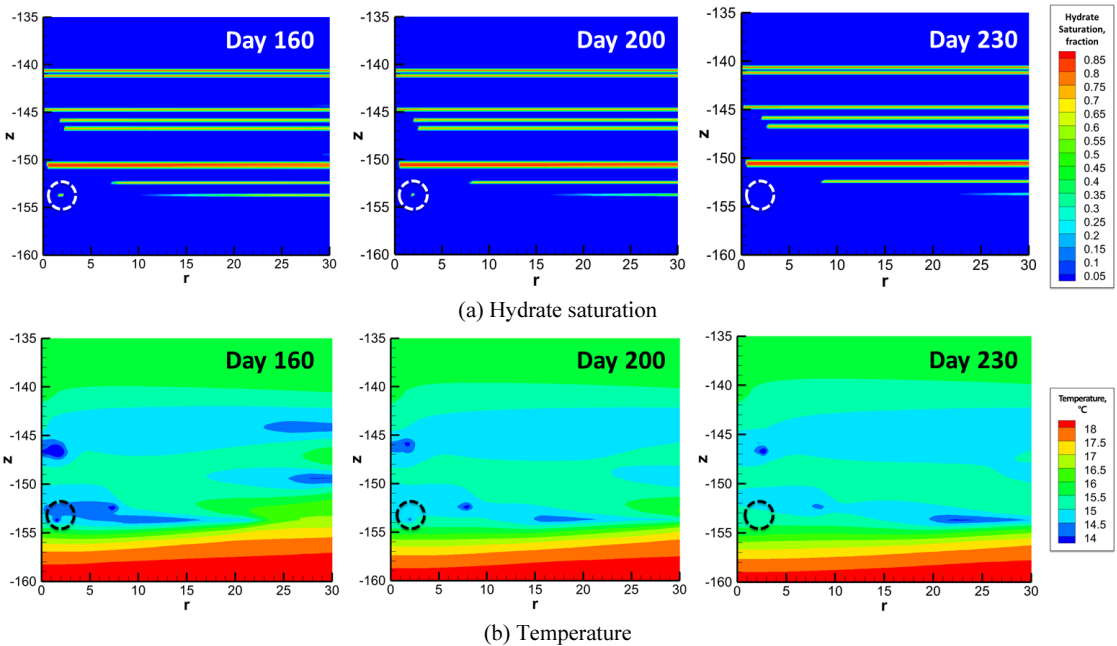


Fig. 7. Hydrate saturation and temperature distributions at 160-day production (left), 200-day production (mid) and 230-day production (right).

일 시점에서 물 생산량은 48 m³/day에서 52 m³/day로 증가하였다. 생산개시 후 1년이 지났을 때 물 생산량은 55 m³/day에 도달하였으며, 누적 물 생산량은 16,570 m³이다. 9 MPa의 공저압을 1년간 적용했을 때, UBGH2-6 가스하이드레이트 저류층에서는 총 391,790 m³의 가스가 생산되었다.

각 층별 생산량은 단일 생산정에서 취득되는 전체 생산량에 대비하여 층별 생산 기여도로 나타낼 수 있다. UBGH2-6의 HBS 내 층별 생산량을 분석하면 사질층 내 하이드레이트 분포가 연속적이지 않은 저류층에서 발생하는 가스 생산 특징을 파악할 수 있으며, 특정 층에서의 구조적 변화가 주변 사질층에 미치는 영향을 분석할 수 있다. Fig. 8은 HBS의 층별 일일 가스 생산량을 도시한 것이다. 일일 가스 생산량이 50 m³/day 이하인 GHS(1번층, 2번층, 7~9번층, 11번층)는 그래프에서 제외하였다. 생산개시 후 200일 부근에서 GHS 10번층의 일일 가스 생산량은 305 m³/day였으며, 이후 천천히 감소하여 생산종료 시점에서는 263 m³/day를 보였다. GHS 14번층의 경우, 생산 초기부터 중반까지는 일일 가스 생산량이 30 m³/day 이하였으나, 215일 이후 공저 인근에 존재하던 하이드레이트가 완전히 해리되면서 가스 생산량이 488 m³/day까지 증가하였다. Fig. 8과 같이 GHS 3~5번층, 12번 및 13번층에서도 꾸준한 가스 생산이 발생하였다. 생산개시 직후에는 GHS 3~5번층의 가스 생산량이 높았으나, 층 두께가 0.1 m이고 하이드레이트 포화율도 38.8%로 하이드레이트 부존량이 상대적으로 적었기 때문에 70~100 m³/day 범위에서 큰 변화가 관찰되지 않았다. GHS 14번층에서 유체 생산이 급격히 이루어지는 215일 시점에서 GHS 12번 및 13번층의 하이드레이트 해리면 전파속도와 가스 생산량이 감소하는 특징을 확인하였다. 반면에 GHS 12번층 상부에 있는 사질층들은 GHS 14번층의 잔류 하이드레이트 해리에 따른 영향을 받지 않았다.

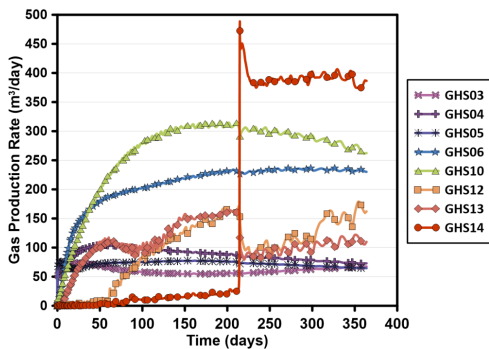


Fig. 8. Gas production rate of each layer during 365-day production test.

Fig. 9는 각 층별 누적 가스 생산량을 나타낸 것으로, 누적 생산량이 5,000 m³ 이하인 GHS는 제외하였다. HBS 구간 내 모든 머드층의 누적 가스 생산량은 1,473 m³로 산출되었다. 주변 GHS에서 발생된 가스가 일부 머드층으로 유동된 것이며, 누적 생산량이 적기 때문에 Fig. 9에서는 제외하였다. 누적 가스 생산량이 가장 많은 곳은 GHS 10번층이며, 6번층에서 두 번째로 많은 가스 생산이 발생하였다. 생산개시 후 215일까지는 GHS 14번층에서의 누적 가스 생산량이 높지 않았으나 정제되었던 유체가 생산됨에 따라 최종적으로는 60,930 m³의 가스가 생산되었다.

Table 3은 사질층별 하이드레이트 해리면 전파거리와 누적 가스 생산량을 정리한 것이다. 해리면 전파가 가장 빠른 곳은 GHS 3~5번층 구간으로 생산종료 후 r-방향으로 80~98 m 범위에서 해리면이 분포하였다. 하이드레이트 해리가 발생하는 층의 특징을 살펴보면 하이드레이트 포화율이 38.8~55.1% 사이이며, 사질층 두께가 0.1~0.2 m에 분포한다. GHS 10번층은 두께가 0.3 m이지만 하이드레이트 포화율이 55.1%로 낮은 특징을 보인다. 이를 기반으로 추론해보면 사질층의 두께가 얇고 포화율이 낮을수록 하이드레이트 해리 및 가스 생산에 유리하다고 볼 수 있다. Zheng *et al.*(2018), Tomasini and Stephen(2020)의 선행연구 분석과 같이 하이드레이트 포화율이 증가할수록 유체가 유동할 수 있는 공간이 좁아지기 때문에 유효 투과도가 감소하게 된다. 따라서 초기 절대투과도 및 상대투과도 자료가 동일하게 적용되었더라도 하이드레이트 포화율이 낮은 사질층에서 유체 생산 및 압력전파가 용이하기 때문에 가스 생산량이 높게 나타난다. 동일한 포화율 조건에서 두께가 얇은 사질층에서 우선적으로 하이드레이트 해리 및 가스 생산이 발생한다. 가스하이드레이트 함유 지층의 두께가 두꺼울수록 하이드레이트 해리에 더 많은 에너지가 소모되기 때문이다. UBGH2-6 저류층의 경우, 사질층 두께가 0.2 m 이하이면서 하이드레이트 포화율이 상대적으로 낮은 층 7개

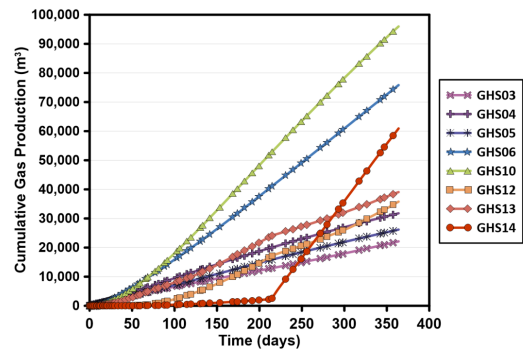


Fig. 9. Cumulative gas production of each layer during 365-day production test.

Table 3. Results of hydrate dissociation front and cumulative gas production of each layers

Domain	Thickness, m	Hydrate saturation, %	Maximum dissociation front, m	Cumulative gas production, m ³
GHS 1	0.2	86.2	0	0
GHS 2	0.3	86.2	0	0
GHS 3	0.1	38.8	98	22,176
GHS 4	0.1	38.8	80	31,846
GHS 5	0.1	38.8	85	26,236
GHS 6	0.2	54.3	63	75,981
GHS 7	0.3	77.7	1	30
GHS 8	0.3	73.8	3	272
GHS 9	0.3	73.8	4	1,590
GHS 10	0.3	55.1	52	96,175
GHS 11	0.6	77.1	1	59
GHS 12	0.2	74.6	16	35,866
GHS 13	0.1	74.6	78	39,157
GHS 14	0.2	74.6	53	60,930
Muds	10	0	0	1,473
Total				391,790

의 층(3~6번층, 12~14번층)에서의 누적 가스 생산량이 총 누적 생산량 대비 74.6% 이상을 차지할 정도로 하이드레이트 해리 및 가스 생산 특성이 뚜렷하게 관찰된다.

저류층 구조에 따른 하이드레이트 생산 영향 분석

하이드레이트 포화율 영향

UBGH2-6 가스 생산 시뮬레이션 관련 선행연구(Moridis *et al.*, 2014; Shin *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2018; Moon *et al.*, 2019)에서는 평균 포화율을 반영하여 사질층의 하이드레이트 분포를 균질하게 설정하였다. 기본모델 시뮬레이션 결과와 같이 하이드레이트 포화율의 수직적 불균질성이 고려됨에 따라 압력전파 및 해리 특성이 크게 변화한다. 본 연구에서는 모든 GHS에서 하이드레이트 포화율이 동일한 균질 분포 모델을 구축하여 기본모델 생산 특성과 비교하였다. 이때 UBGH2-6의 평균 하이드레이트 포화율인 70.7%를 포함하여 65%, 60%까지 총 3가지 경우에 대해 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

하이드레이트 포화율 모델별 시간에 따른 유체 생산량은 Fig. 10과 같다. 생산 초기에는 포화율이 65% 이하인 경우 하이드레이트 해리가 일찍 발생하여 일일 가스 생산량이 빠르게 증가하였다. 하이드레이트 포화율이 70.7%일 때,

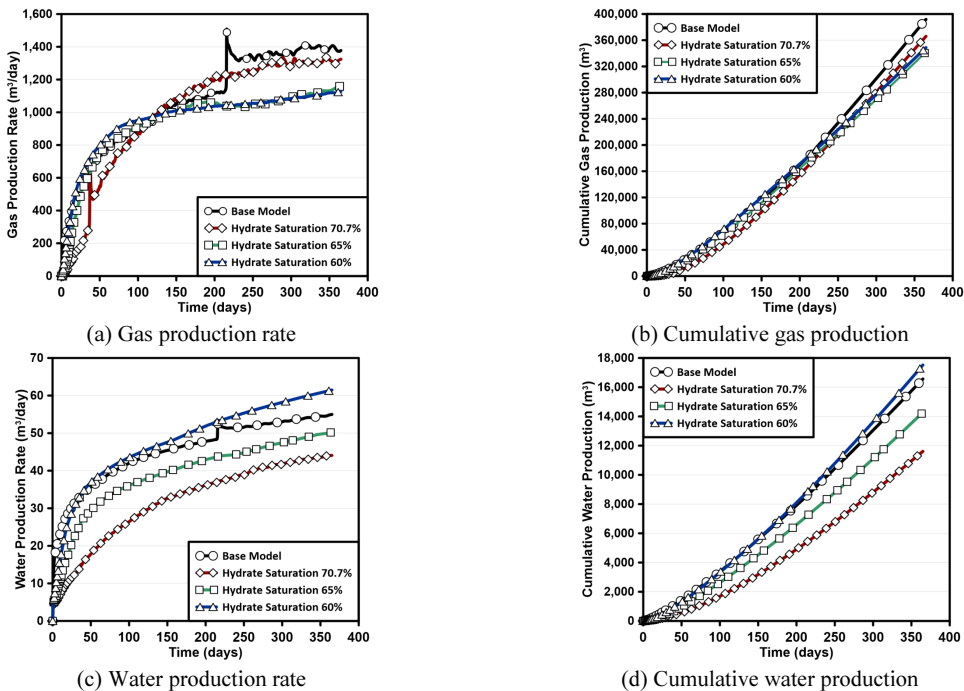
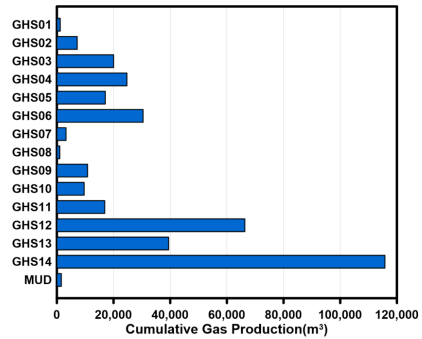
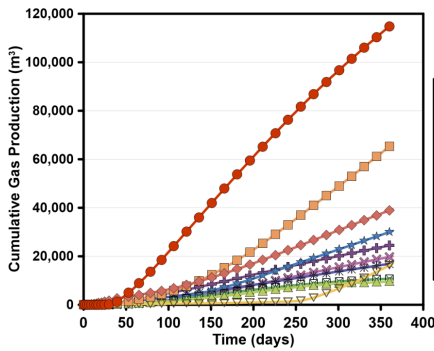


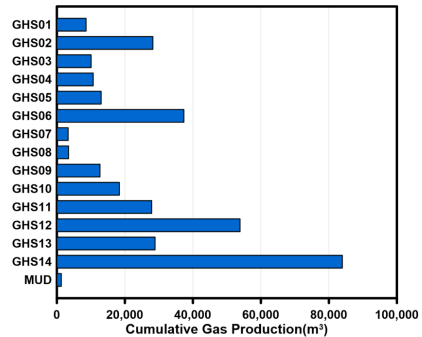
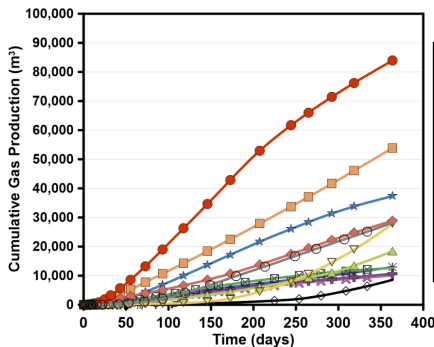
Fig. 10. Gas and water production data depending on initial hydrate saturation.

초기에는 일일 가스 생산량이 다른 모델에 비해 상대적으로 적었으나, 40일 시점에서 일일 가스 생산량이 급격히 증가하였다. GHS 14번층의 공저 인근에 잔류되어 있던 하이드레이트가 해리되면서 유체 생산량이 증가한 것으로 확인되었다. 생산종료 시점까지 모든 포화율 모델에서 일일 가스 생산량이 꾸준히 증가하였으며, 포화율 70.7%, 65%, 60% 모델의 누적 가스 생산량은 각각 365,930 m³, 342,440 m³, 348,800 m³이다. 물 생산량과 가스 생산량이 기본모델과 차이를 보이는 것은 포화율 변화에 따라 물과 가스의 유효 투과도가 다르게 적용되면서 발생한 것으로 분석되었다.

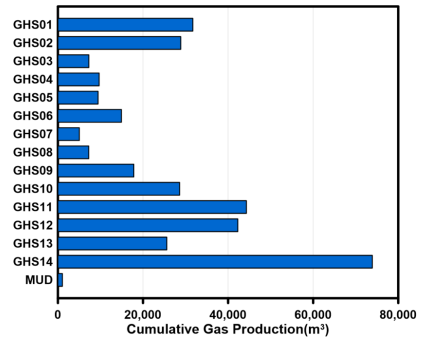
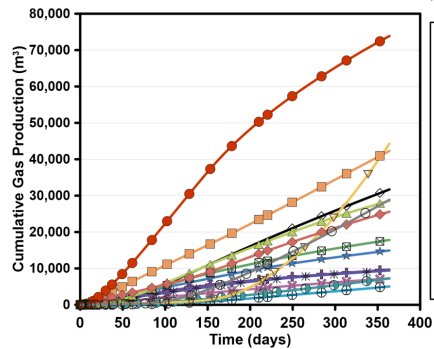
Fig. 11은 포화율 모델별 각 사질층의 누적 가스 생산량을 도시한 것이다. 포화율 모델에 관계없이 GHS 14번층의 누적 가스 생산량이 가장 높았으며, GHS 12번층 및 13번층에서도 높은 생산량을 보였다. 하이드레이트 평형곡선에 따르면 저류층 온도가 증가함에 따라 하이드레이트 평형압력이 증가하게 된다. 평형압력에 비해 공저압이 낮을수록 하이드레이트 해리가 발생하기 용이하고 가스 생산량도 증가한다. HBS 전체에 걸쳐 동일한 공저압이 적용되었을 경



(a) Hydrate Saturation 70.7%



(b) Hydrate Saturation 65%



(c) Hydrate Saturation 60%

Fig. 11. Cumulative gas production of each layer depending on initial hydrate saturation: during 365-day production test (left), at the end of production test (right).

우, 하이드레이트 평형압력이 상대적으로 높은 하부층에서 해리가 더 잘 이루어지기 때문에 가스 생산량이 높게 나타난 것이다. 포화율 70.7% 모델에서는 GHS 3~6번층, GHS 12~14번층의 생산량이 대부분을 차지한다. 특히 사질층 두께가 0.6 m인 GHS 11번층의 생산량 변화가 두드러진다. 포화율이 70.7%일 때 생산종료 시점에서 GHS 11번층의 누적 가스 생산량은 16,900 m³였으나, 60% 포화율에서는 44,302 m³까지 증가하였다. 기본모델에서는 하이드레이트 포화율이 높아 전혀 생산이 발생하지 않았던 GHS 1번층 및 2번층의 생산량도 크게 증가한 것을 확인할 수 있다.

하이드레이트 포화율 변화에 따른 누적 가스 및 물 생산량, 해리면 최대 전파거리는 Table 4에 정리하였다. Fig. 12는 생산이 종료된 시점에서의 모델별 하이드레이트 포화율 분포를 도시한 것이다. 포화율 70.7% 모델에서 GHS 13번층의 하이드레이트 해리가 가장 빠르게 진행되어 해리면이 80 m에 도달하였으며, GHS 3~5번층의 해리면은 50 m 내외에 위치하였다. 하이드레이트 포화율이 감소할수록 해리면이 고르게 전파되는 경향을 보인다. 65% 포화율 모델에서 해리면 최대값은 GHS 14번층의 60 m이며, GHS 7번층과 11번층은 70.7% 포화율 모델보다 더 해리되었다. Fig. 12(c)와 같이 60% 포화율 모델의 하이드레이트 해리면은 더욱 부드러운 전파양상을 보인다. 포화율 70.7% 모델의 생산종료 시점에 하이드레이트 해리면이 10 m를 넘지 못하는 층은 총 5개인 반면에 포화율 65% 모델에서는 4개, 60% 모델에서는 3개로 감소하였다. 이는 하이드레이트 포화율이 감소함에 따라 GHS 12~14번층의 해리면 전파가 더디던 대신에 GHS 1번층 및 2번의 해리면이 빠르게 전파되었기 때문이다.

하이드레이트 포화율 모델별 생산자료를 종합한 결과, 하이드레이트 포화율이 수직적으로 불균질한 기본모델에서 가스 생산량이 높게 산출되었다. 이는 하이드레이트 포화율이 상대적으로 낮은 소수의 GHS에서만 해리가 이루어

지면서 압력전파가 집중되었기 때문이다. 반면에 60~70.7%의 하이드레이트 포화율에서는 HBS 전체에 걸쳐 해리면이 고르게 전파되려는 경향을 보인다. 특히 기본모델에서 포화율이 높아 전혀 해리되지 않았던 GHS 1번층과 2번층이 포화율 60% 모델에서는 빠르게 해리되었다. GHS 7~9번층의 경우, 기본모델에서는 누적 가스 생산량이 30~1,590 m³의 범위였으나 평균 하이드레이트 포화율이 감소함에 따라 5,000~17,800 m³까지 가스 생산량이 증가하였다. GHS 11번층도 기본모델에서는 가스 생산이 거의 발생하지 않았으나 포화율이 감소함에 따라 생산량이 크게 변화하였다. 이러한 결과를 통해 하이드레이트 포화율에 따른 유효 투과도 변화가 가스 생산에 미치는 영향이 높음을 확인하였다. 본 연구에서는 평균 하이드레이트 포화율을 70.7%

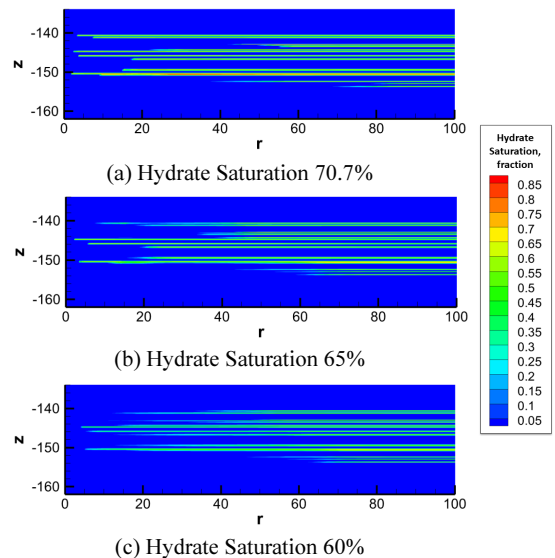


Fig. 12. Spatial distribution of hydrate saturation at the end of production test depending on initial hydrate saturation.

Table 4. Results of cumulative production and hydrate dissociation front depending on initial hydrate saturation

Cases	Gas		Water		Maximum Dissociation Front, m (Layer)
	Cumulative gas production, m ³	Difference from base case	Cumulative water production, m ³	Difference from base case	
Base	391,790	-	16,570	-	98 (GHS 3)
70.7%	365,930	-6.6%	11,610	-29.9%	80 (GHS 13)
65%	342,440	-12.6%	14,280	-13.8%	60 (GHS 14)
60%	348,800	-11.0%	17,520	5.7%	62 (GHS 14)

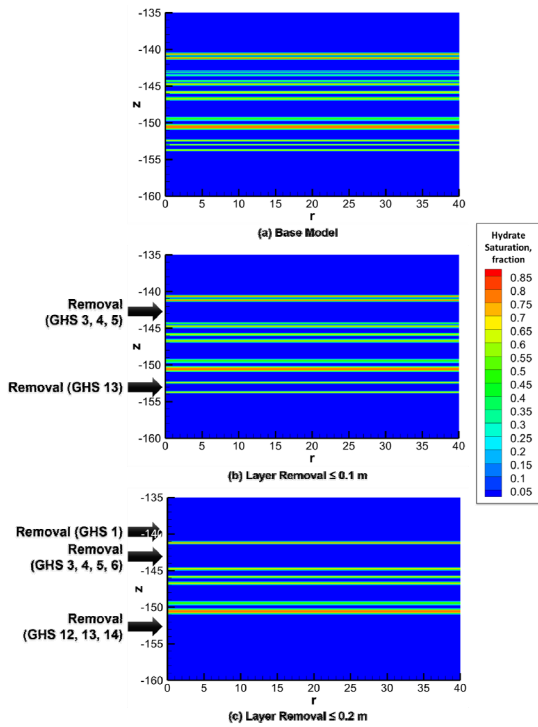


Fig. 13. Spatial distribution of initial hydrate saturation depending on removal of thin layers.

이하인 경우에 대해서만 분석하였으며, 한계 하이드레이트 포화율을 파악하기 위해서는 70.7% 이상인 모델에 대해 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

박층 유무 영향

본 연구에서는 단순지층모델의 최소 사질층 두께 0.37 m의 절반 수준인 0.2 m를 박층 판단 기준으로 설정하였다. UBGH2-6 기본모델 분석 결과, 가스 생산량의 대부분이 0.2 m 이하의 박층에서 발생하고 있다. 기본모델은 시추공 검층 및 코어자료 분석결과를 바탕으로 구축된 것이나 박층의 연속성에 대해서는 불확실성이 존재한다. 박층 분포 구조가 하이드레이트 해리 및 생산에 미치는 영향을 분석하고자 박층 유무, 비연속구간, 분포범위에 따른 시뮬레이션을 각각 수행하였다. Fig. 13은 기본모델에서 0.1 m, 0.2 m 이하의 GHS 층을 삭제하여 구축한 모델이다. Fig. 13(b)에서는 두께가 0.1 m인 4개의 GHS(3~5번층, 13번층)를 삭제하였으며, Fig. 13(c)에서는 두께가 0.2 m인 GHS 1번층, 6번층, 12번층, 14번층까지 삭제하였다. 해당 모델들을 통해 두께 0.3 m 이상의 GHS 층에서 하이드레이트 해리 및 가스 생산량 변화를 분석할 수 있다. 이때 하이드레이트 포화율은 기본모델과 동일하게 수직적으로 불균질한 분포를 적용하였다.

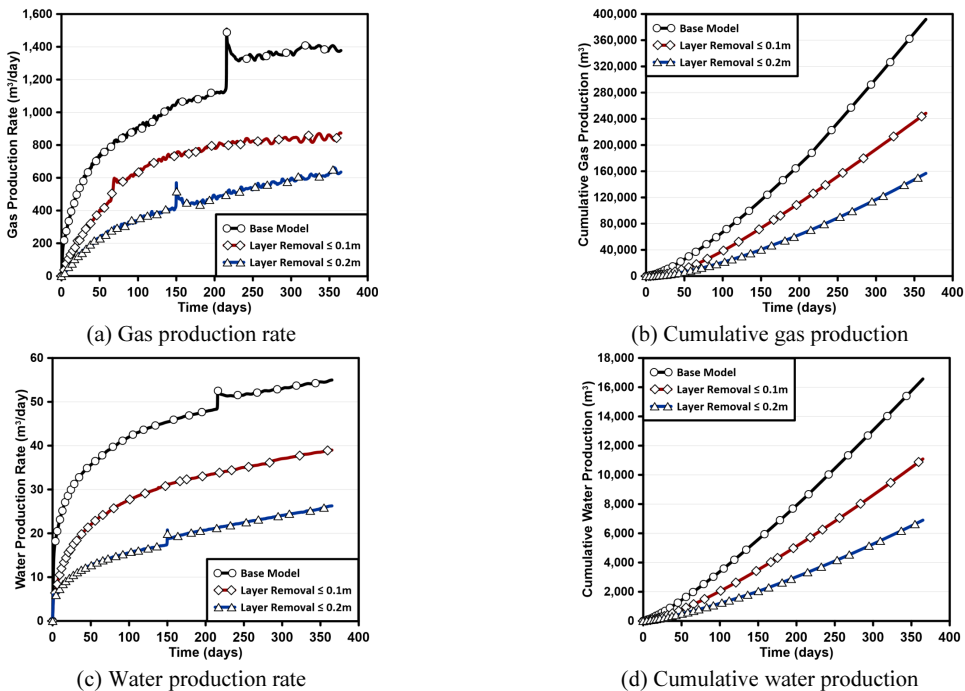


Fig. 14. Gas and water production data depending on removal of thin layers.

Fig. 14는 박층 유무에 따른 하이드레이트 해리 및 가스 생산량 변화를 도시한 것이며, Fig. 15의 층별 누적 가스 생산량 비교를 통해 박층 삭제에 따른 가스 생산 영향을 상세히 분석할 수 있다. 생산종료 시점에서 누적 가스 생산량은 기본모델에 비해 143,270 m³ 감소된 248,520 m³으로 산출되었다. 기본모델에서 0.1 m의 박층(GHS 3~5번층, 13번층)으로부터 생산된 누적 가스 생산량은 119,400 m³이었다. 따라서 0.1 m 박층에서 생산된 가스량에 비해 23,870 m³ 만큼의 가스 생산이 더 감소한 것이다. 0.1 m의 박층만 제외하였을 때, 하이드레이트 총량은 기본모델 대비 8.2% 정도 감소한다. 그러나 누적 가스 생산량은 40% 가까이 감소한 것은 박층에서의 하이드레이트 해리 및 가스 생산이 전체 생산량에 크게 기여하였음을 보여준다. Fig. 15(a)와 같이 사질층별 생산량을 분석해보면 GHS 3~5번층과 인접한 GHS 6번층의 누적 가스 생산량은 59,243 m³으로 기본모델에 비해 22% 정도 감소하였으며, GHS 13번층과 인접한 GHS 12번층 및 14번층의 생산량도 유사한 감소 경향을 보였다. 이를 통해 0.1 m의 박층이 주변 GHS의 가스 생산에도 영향을 미쳤음을 추론해 볼 수 있다. 기본모델에서는 0.1 m의 박층이 해리되면서 공저압 전파 범위를 확장시켜

주변 GHS의 하이드레이트 해리에 영향을 미친 것으로 보이나, 박층이 삭제되면서 이러한 영향이 사라져 하이드레이트 해리가 더더지고 생산량이 감소한 것으로 판단된다. 한편 0.1 m 삭제 모델에서 GHS 10번층의 누적 가스 생산량은 116,900 m³으로 기본모델(95,985 m³)보다 20,915 m³만큼 증가하였다. 9 MPa 공저압 적용에 따른 압력 및 해리면 전파가 GHS 10번층에 집중되었기 때문이다.

두께 0.2 m 이하의 박층을 모두 제외하면 하이드레이트 총량이 138,050 m³으로 기본모델에 비해 33% 감소한다. 누적 가스 생산량의 경우, 기본모델보다 60% 감소된 156,770 m³으로 산출되었다. Fig. 14(c)와 Fig. 14(d)는 물 생산량을 비교한 것이며, 0.1 m 삭제 모델 및 0.2 m 이하 삭제 모델 모두 가스 생산량 변화와 유사한 경향을 보였다. 하이드레이트 총량보다 유체 생산량 감소폭이 큰 점은 0.1 m 삭제 모델에서와 같이 0.2 m의 박층도 UBGH2-6 가스 생산에 미치는 영향이 상당하다는 것이다. Fig. 15(b)와 같이 0.2 m 이하 박층 삭제 모델에서도 GHS 10번층의 누적 생산량이 가장 높은 것으로 나타났다. 일정수준 가스 생산이 발생하던 GHS 6번층, 12번층, 14번층이 모델에서 제외됨에 따라 GHS 9번층의 가스 생산량이 35,830 m³으로 두번째

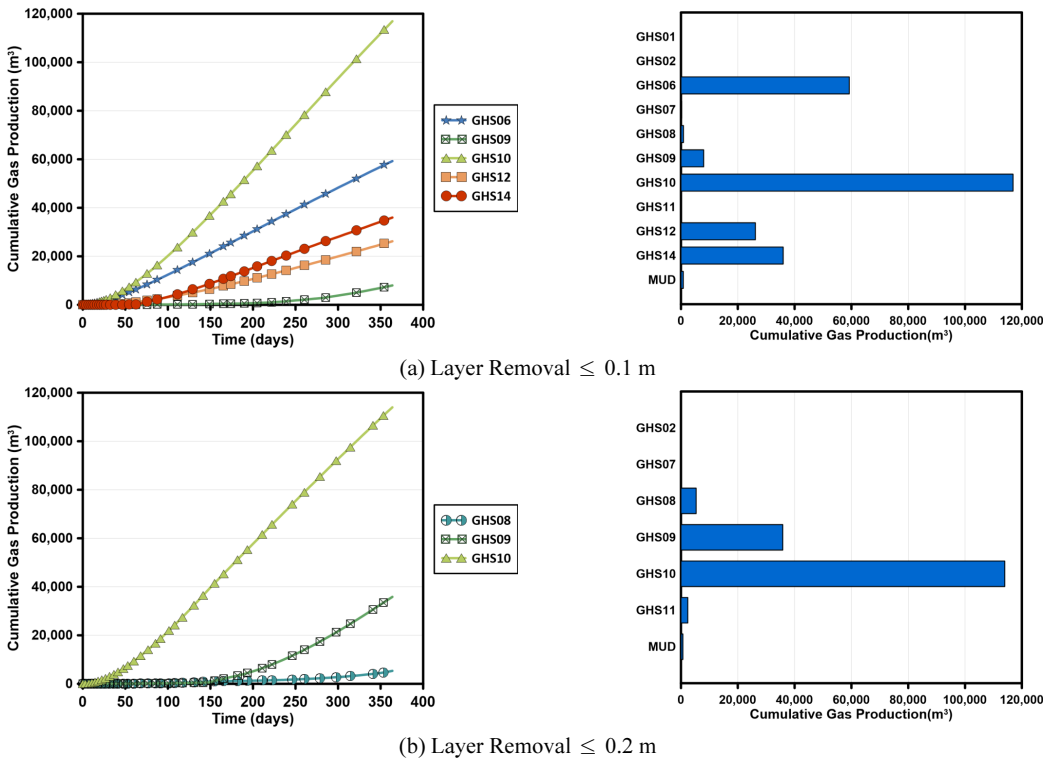


Fig. 15. Cumulative gas production of each layer depending on removal of thin layers: during 365-day production test (left), at the end of production test (right).

Table 5. Results of cumulative production and hydrate dissociation front depending on removal of thin layers

Cases	Gas		Water		Maximum Dissociation Front, m (Layer)
	Cumulative gas production, m ³	Difference from base case	Cumulative water production, m ³	Difference from base case	
Base	391,790	-	16,570	-	98 (GHS 3)
≤ 0.1 m	248,520	-36.6%	11,090	-33.1%	62 (GHS 10)
≤ 0.2 m	156,770	-60.0%	6,900	-58.4%	68 (GHS 10)

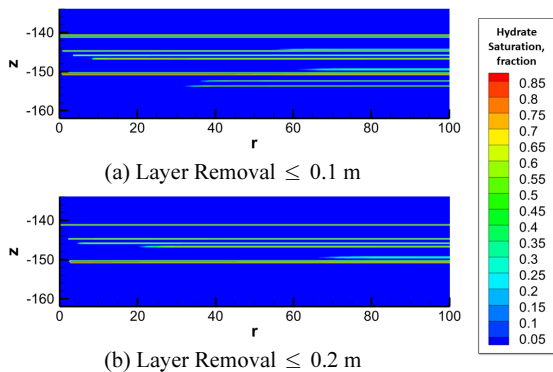


Fig. 16. Spatial distribution of hydrate saturation at the end of production test depending on removal of thin layers.

로 높게 측정되었다. GHS 8번층의 경우에도 기본모델에서는 하이드레이트 해리가 거의 발생하지 않았으나, 0.2m 박층이 삭제된 모델에서는 5,335 m³까지 생산량이 증가하였다. 0.2 m 이하 박층 삭제 모델에서는 GHS 8~10번층을 제외하고는 유의미한 가스 생산이 발생하지 않았다.

Table 5는 박층 제외 모델의 유체 생산량과 하이드레이트 해리면의 최대 전파거리를 정리한 것이다. 또한 Fig. 16은 박층 제외 모델별 하이드레이트 포화율 분포를 나타낸 것이다. 기본모델에서 최대 누적 가스 생산량을 보인 GHS 10번층에서의 해리면의 경우, 0.1 m 삭제 및 0.2 m 이하 삭제 모델에서는 각각 62 m, 68 m로 나타났다. 박층을 제거하면 하이드레이트 해리가 다른 층에서도 발생할 것으로 예상했으나 GHS 9~10번층을 제외하고는 여전히 가스를 생산하기 어려웠다. 본 분석에서 활용된 박층 제외 모델은 수직적으로 불균질한 하이드레이트 포화율을 갖는 기본모델을 기준으로 구축하였기 때문에 층 두께와 하이드레이트 포화율의 영향이 복합적으로 발생하였다. 향후 하이드레이트 포화율이 균질한 조건에서 박층 제외 모델을 구축한다면 박층만의 영향을 독립적으로 분석할 수 있을 것이라 판단된다.

박층 비연속구간 영향

물리검층을 통해서 시추공 인근 수 m의 범위를 관측할 수 있으나 수십 m 범위까지는 분석하기 어렵다. 박층이 공저인근에서만 분포하거나 일부 비연속구간을 갖는 가능성을 고려할 필요가 있다. 기본모델에서 1년간 감압법 적용 시, 두께 0.1 m 박층의 하이드레이트 해리면은 최소 78 m까지 전파되었다. 박층의 비연속구간이 78 m의 절반 정도에 위치하도록 하여 박층의 비연속구간에 따른 가스 생산 영향을 분석하고자 하였다. Fig. 17은 공저인근 10 m 이후에 각각 10 m, 20 m의 비연속구간을 갖는 모델을 구축한 것이다. Fig. 17(a)의 기본모델과 비교했을 때, Fig. 17(b)에서는 GHS 3~5번층, 13번층의 r-방향 10~20 m 범위에 비연속구간이 존재한다. Fig. 17(c)의 경우, GHS 3~5번층, 13번층의 공저인근 10~30 m에 비연속구간이 포함되도록 모델을 구성하였다. 해당 구간에서는 하이드레이트 포화율이 0인 사질층의 특성을 가지며, 초기에는 물로만 포화된 것으로 가정하였다.

Fig. 18과 Fig. 19는 박층 비연속구간에 따른 저류층 및 층별 생산량을 각각 도시한 것이다. 박층 비연속구간이 10 m인 경우, 생산개시 후 10~20일 사이에 GHS 3~5번층이 해리되고 비연속구간에 포함될 물만 생산되면서 Fig. 18(a)와 같이 가스 생산량이 정체되었다. 반면에 해당 시점에서 물 생산량은 급격히 증가하여 43 m³/day에 도달하였다. 20일 이후부터 물 생산량이 감소하면서 다른 GHS 층에서도 하이드레이트 해리가 시작되어 가스 생산량이 증가하였다. 45일 시점에서는 GHS 13번층의 전반부 10 m가 모두 해리되고 비연속구간에서의 유동이 시작되면서 물 생산량이 다시 한번 증가하였다. 이때 가스 생산량이 일시적으로 감소하였으나 50일부터는 빠르게 회복되어 120일까지 지속적으로 증가하였다. Fig. 19(a)를 보면 200일 부근에서 GHS 14번층 공저인근의 잔류 하이드레이트가 해리되면서 누적 가스 생산량이 증가하는 것을 알 수 있다.

비연속구간이 20 m인 모델에서도 비연속구간 10 m 모델과 유사한 유체 생산 특성을 확인할 수 있다. GHS 3~5번층

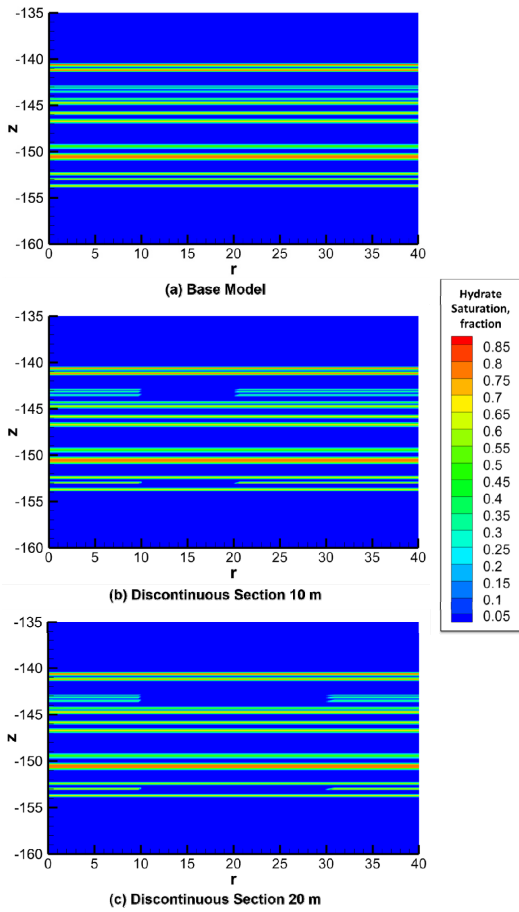


Fig. 17. Spatial distribution of initial hydrate saturation depending on discontinuous section in thin layers.

의 전면부 해리에 따른 생산 특징은 동일했으나, 물로 포화된 비연속구간이 길어짐에 따라 가스 생산량 정체기간이 길어지며 일일 물 생산량도 더 크게 증가하였다. GHS 14번 층의 잔류 하이드레이트 해리에 의한 영향은 170일 시점에서 관측되었으며, Fig. 19(b)에서도 확인할 수 있다. 유체 생산량의 변화가 다양하게 발생하였음에도 불구하고 두 모델 모두 누적 가스 생산량은 기본모델과 큰 차이를 보이지 않았다. 비연속구간이 길어질수록 저류층 내 물이 더 많이 포화되어 있기 때문에 누적 물 생산량은 증가하였다. Fig. 19의 층별 누적 가스 생산량 추이는 기본모델에서의 결과와 유사하다. GHS 6번층과 10번층에서 가장 많은 가스 생산이 발생하였으며, GHS 12~14번층, GHS 3~5번층 순으로 높은 생산량을 보였다. 기본모델과 비교했을 때, GHS 12번층의 생산량이 GHS 14번층보다 높다는 점이 상이하나 총 누적 생산량에는 큰 변화가 없었다.

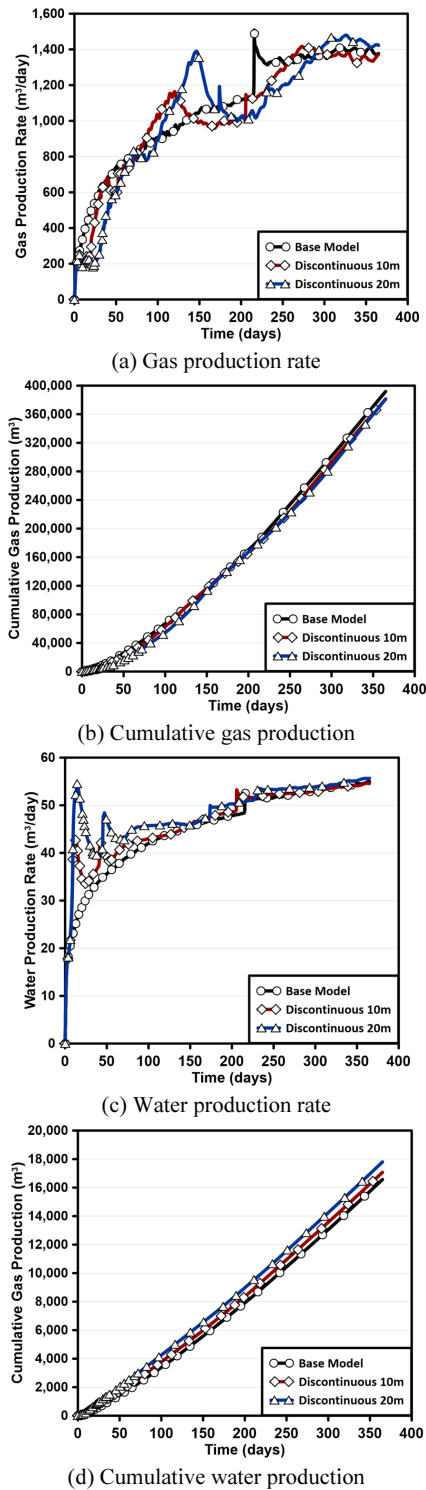


Fig. 18. Gas and water production data depending on discontinuous section of thin layers.

Table 6은 박층 비연속구간에 따른 누적 유체 생산량 및 해리면 전파거리를 정리한 것이다. GHS 14번층에서 생산량이 기본모델에 비해 다소 낮은 이유는 Fig. 20의 하이드레이트 포화율 분포도를 통해 분석할 수 있다. 비연속구간이 10 m인 경우, 생산중료 시점에도 GHS 14번층 20 m 부근에 하이드레이트가 여전히 잔류해있는 것을 볼 수 있다.

비연속구간 20 m 모델에서도 GHS 14번층 30 m 부근에 잔류 하이드레이트가 관측되었다. 이로 인해 하이드레이트 해리에 따라 가스가 발생하였음에도 유효 투과도가 낮아 공저로 유동되지 못하고 정체된 것으로 보인다. 잔류된 하이드레이트 부분을 제외하고 전체적인 하이드레이트 포화율 분포 및 해리면 전파는 기본모델과 매우 유사한 결과를

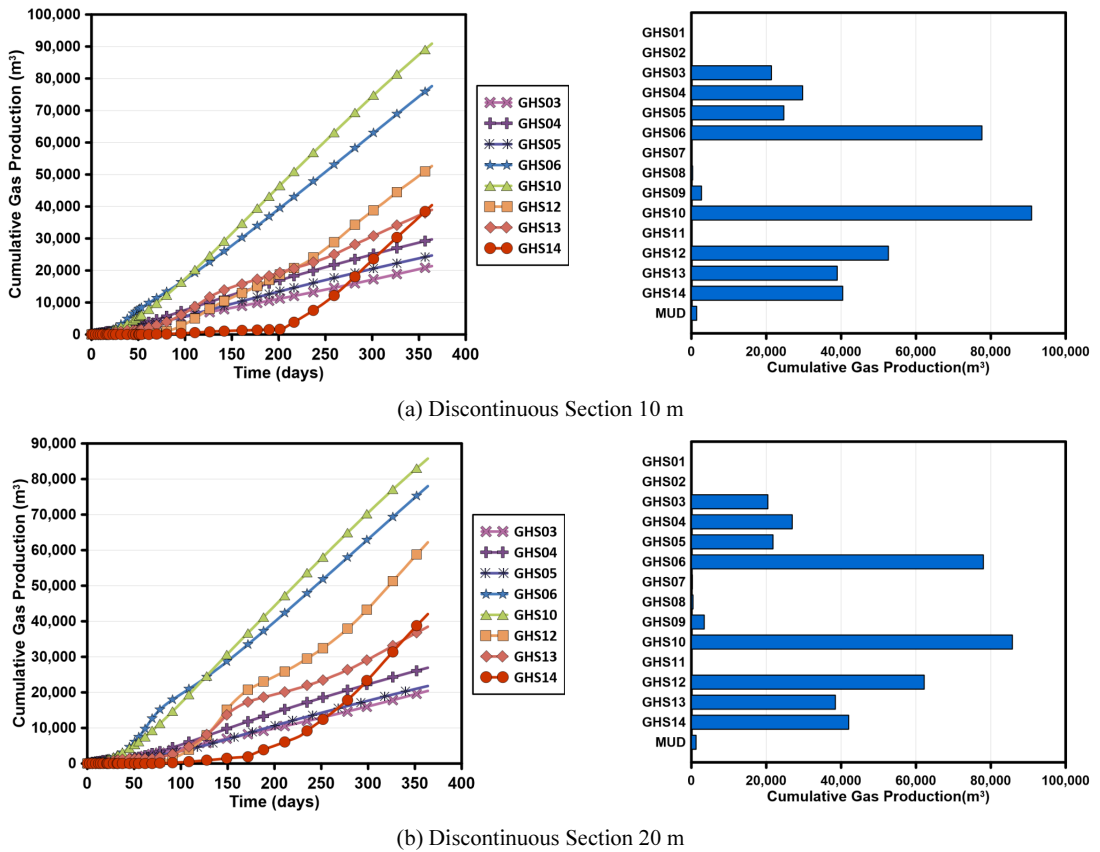


Fig. 19. Cumulative gas production of each layer depending on discontinuous section of thin layers: during 365-day production test (left), at the end of production test (right).

Table 6. Results of cumulative production and hydrate dissociation front depending on discontinuous section of thin layers

Cases	Gas		Water		Maximum Dissociation Front, m (Layer)
	Cumulative gas production, m ³	Difference from base case	Cumulative water production, m ³	Difference from base case	
Base	391,790	-	16,570	-	98 (GHS 3)
10 m	381,400	-2.7%	17,070	3.0%	95 (GHS 3)
20 m	381,080	-2.7%	17,800	7.4%	96 (GHS 3)

보였다. 따라서 박층의 비연속구간이 하이드레이트 해리 및 가스 생산에 미치는 영향은 크지 않다. 향후 박층의 비연속구간의 위치와 길이를 다양하게 변경하여 모델을 구축한다면 가스 생산 영향을 추가로 분석할 수 있을 것이다.

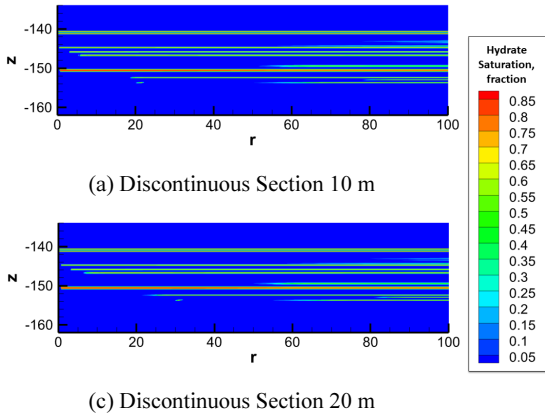


Fig. 20. Spatial distribution of hydrate saturation at the end of production test depending on discontinuous section of thin layers.

박층 분포범위 영향

일부 비연속구간과 달리 하이드레이트가 공저 인근에서만 분포할 수도 있다. Fig. 21은 박층 분포범위에 따른 초기 하이드레이트 포화율 분포를 나타낸 것이다. 박층 분포범위에 대한 영향을 모사하기 위해 두께 0.1 m의 박층(GHS 3~5번층, 13번층)이 공저로부터 3 m, 10 m, 30 m에만 분포하는 것을 가정하여 모델을 구축하였다. 하이드레이트 분포구간 이후에는 저투과성의 머드층이 존재했을 때 HBS에서의 하이드레이트 생산 영향을 분석하였다.

두께 0.1 m인 박층이 공저인근 3 m, 10 m, 30 m 까지만 존재할 때의 유체 생산량 변화는 Fig. 22와 같다. 박층에서의 하이드레이트 해리 속도가 빠르기 때문에 박층 분포범위에 따른 영향이 뚜렷하게 나타난다. 박층 분포범위가 3 m로 짧은 경우, 생산 초기에 박층의 하이드레이트가 모두 해리되어 가스 생산량이 급격히 감소하였다. 3 m의 박층구간 이후에는 머드층이 존재하기 때문에 물이 유동되지 않아 물 생산량의 감소도 관찰되었다. 박층 분포범위가 10 m, 30 m로 증가하면 가스 생산량 변화시점이 각각 10일, 105일로 늦춰졌다. 박층 분포범위가 30 m인 모델의 누적 가스 생산량은 330,000 m³으로 기본모델 대비 15.9% 감소되었다. 박층의 범위가 3 m, 10 m 모델에서는 누적 가스 생산량이 각각 246,000 m³, 262,000 m³으로 37.2%, 33.1% 정도 감소

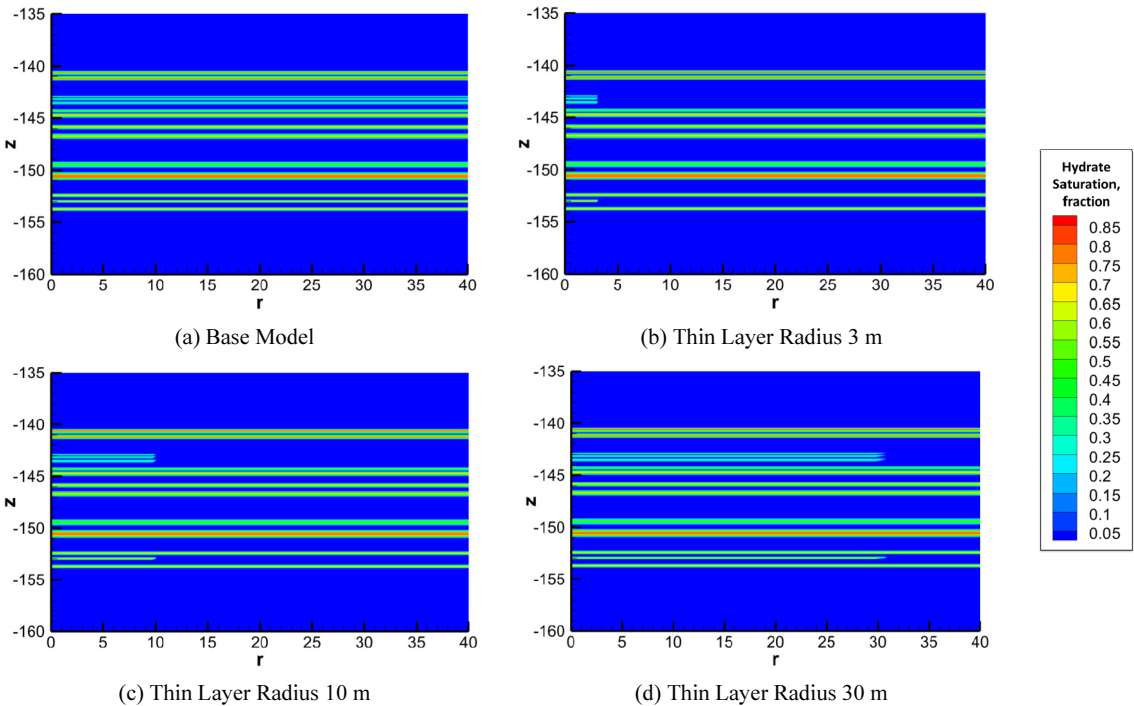
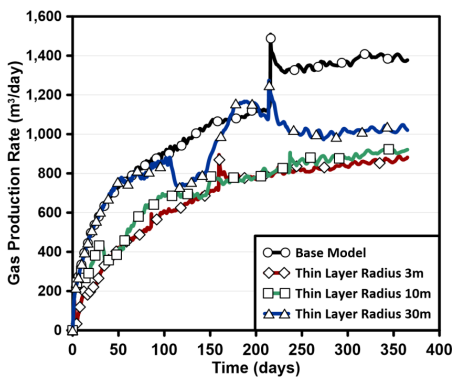


Fig. 21. Spatial distribution of initial hydrate saturation depending on radius of thin layers.

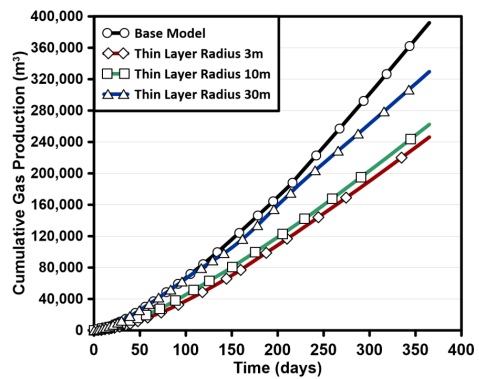
하였다. 한편 박층 분포범위를 변화시켰을 경우, UBGH2-6의 하이드레이트 총량은 기본모델 대비 8% 정도 감소한다. 따라서 하이드레이트 총량 변화폭보다 누적 가스 생산량의 감소폭이 더 크다는 것이 특징이다.

Fig. 23은 박층 분포범위에 따른 층별 누적 가스 생산량을 도시한 것이다. 박층 분포범위에 관계없이 GHS 6번층 및 10번층에서 가스하이드레이트가 주로 생산된다. 박층 분포범위가 넓어짐에 따라 하이드레이트 부존량이 늘어나기 때문에 GHS 3~5번층에서의 누적 가스 생산량이 증가하였다. GHS 13번층의 분포범위가 증가할수록 GHS 12번층의 생산량도 증가하는 경향을 보인다. GHS 13번층에 전파된 압력이 주변 GHS에도 영향을 미친 것으로 분석되었다. GHS 14번층의 경우, 공저인근에서 잔류된 하이드레이트의 해리시점에 따라 누적 가스 생산량의 차이를 보인다.

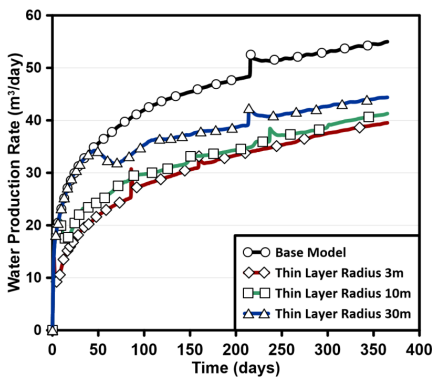
Table 7은 박층 분포범위에 따른 누적 유체 생산량 및 해리면 전파거리를 정리한 것이며, Fig. 24는 생산중료 시점에서의 박층 분포범위별 하이드레이트 포화도를 도시한 것이다. 생산중료 시점에서 두께 0.1 m 박층에 존재하는 하이드레이트가 모두 해리된 것을 볼 수 있다. 박층 분포범위 3 m, 10 m인 모델에서 GHS 6번층 및 10번층의 하이드레이트 해리면은 60~70 m 범위에서 유사한 값을 갖는다. 박층 분포 30 m 모델에서는 GHS 6번층의 하이드레이트 해리면이 80 m까지 전파되었으며, GHS 10번층은 60 m에 도달하였다. 그럼에도 불구하고 GHS 10번층의 생산량이 높은 것은 포화도는 유사하나 사질층이 두꺼워 하이드레이트 해리량이 많기 때문이다. 하이드레이트 해리면은 박층의 길이가 길어질수록 증가하는 경향을 보인다. 박층에서 발생하는 압력전파가 주변 GHS에도 영향을 미쳤을 가능성이 높다. 따라서 UBGH2-6의 모든 GHS를 상세히 조사해야만 감압법 적용에 따른 하이드레이트 해리 및 가스 생산 특성을 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 현재의 가스 생산량 분석결과에는 GHS의 층 두께와 하이드레이트 포화율의 영향이 복합적으로 반영된 것이며, 향후 균질한 포화율 조건에서 분석을 수행함으로써 박층의 영향을 추가적으로 분석할 예정이다.



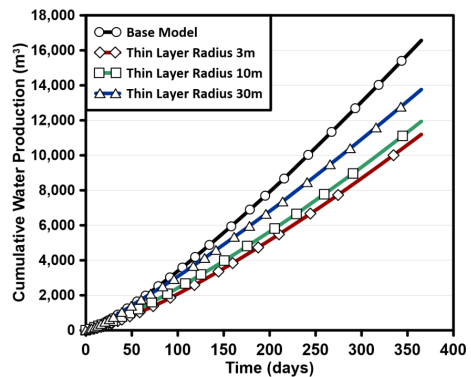
(a) Gas production rate



(b) Cumulative gas production

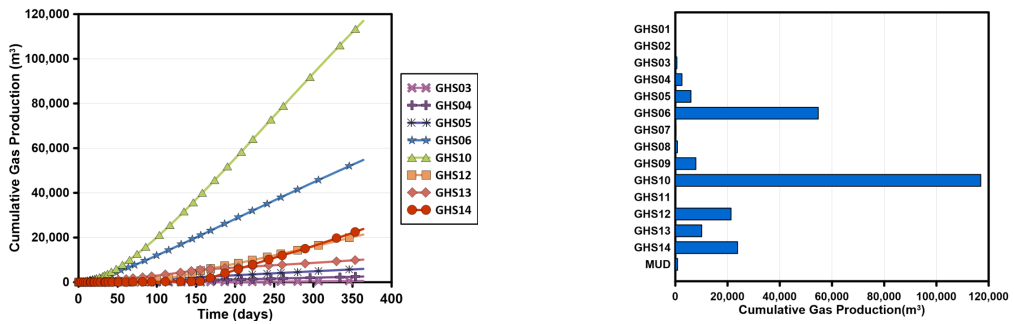


(c) Water production rate

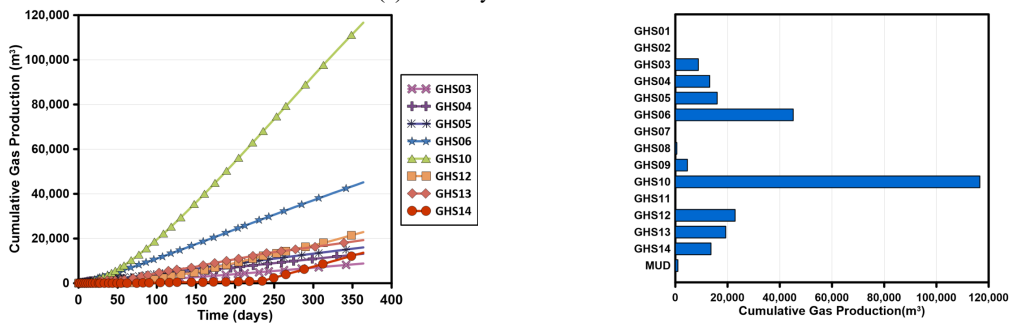


(d) Cumulative water production

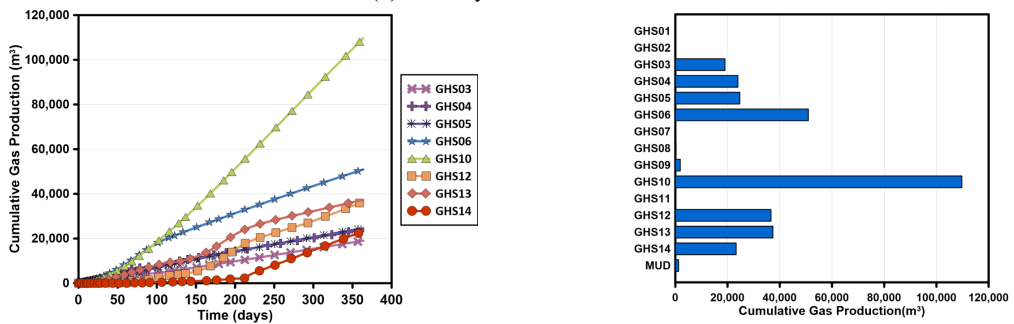
Fig. 22. Gas and water production data depending on radius of thin layers.



(a) Thin Layer Radius 3 m



(b) Thin Layer Radius 10 m



(c) Thin Layer Radius 30 m

Fig. 23. Cumulative gas production of each layer depending on radius of thin layers: during 365-day production test (left), at the end of production test (right).

Table 7. Results of cumulative production and hydrate dissociation front depending on radius of thin layers

Cases	Gas		Water		Maximum Dissociation Front, m (Layer)
	Cumulative gas production, m ³	Difference from base case	Cumulative water production, m ³	Difference from base case	
Base	391,790	-	16,570	-	98 (GHS 3)
3 m	246,160	-37.2%	11,190	-32.5%	60 (GHS 10)
10 m	262,280	-33.1%	11,940	-27.9%	70 (GHS 6)
30 m	329,530	-15.9%	13,760	-17.0%	80 (GHS 6)

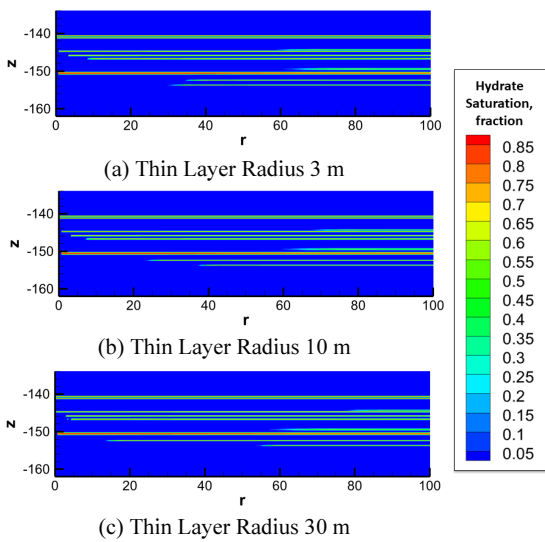


Fig. 24. Spatial distribution of hydrate saturation at the end of production test depending on radius of thin layers.

결론

본 연구에서는 동해 울릉분지 UBGH2-6의 세부지층모형을 기반으로 하이드레이트 저류층 모델을 구축하였으며, 감압법 적용에 따른 유체 생산 특성을 분석하였다. 하이드레이트 포화율 및 박층 구조에 따라 하이드레이트 해리면 전파 및 사질층별 생산 기여도를 파악하였으며, 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) UBGH2-6 단순지층모형을 통해 저류층 시뮬레이션 입력자료 및 결과의 타당성을 검토하였다. 선행연구와 동일한 저류층 모델을 구축하여 생산자료를 비교한 결과, 공저압 변화에 따른 유체 생산량 변화와 전체적인 생산 추이가 유사하게 나타났다. 이를 통해 UBGH2-6 저류층 모델 구성에 필요한 입력자료를 정리하였으며, TOUGH+HYDRATE를 이용한 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하였다.
- (2) 총 14개의 사질층으로 구성된 세부지층모형을 기반으로 UBGH2-6 저류층 기본모형을 구축하였다. 사질층 두께는 최소 0.1 m에서 최대 0.6 m이며, 가스하이드레이트 포화율은 38.8~86.2% 범위에서 사질층별로 수직적 불균질 분포 특징을 갖는다. 공저압 9 MPa의 감압법을 1년간 적용한 결과, 하이드레이트 포화율이 60% 이하이면서 두께가 0.2 m 이하인 사질층에서 하이드레이트 해리 및 가스 생산이 먼저 발생하였다. 포화율이 낮고 박층인 사질층은 전체 누적 가스 생산량의 74.6%를 차지할 정도로 생산 기여도가

높은 것을 확인하였다.

- (3) 하이드레이트 분포에 따른 영향을 분석하기 위해 초기 포화율이 70.7%, 65%, 60%인 모델을 구축하였으며, 기본모델과 비교하여 가스 생산량 변화를 분석하였다. 소수의 사질층에서만 하이드레이트 해리가 발생하는 수직적 불균질 포화율 모델에서 가스 생산량이 높았으며, 60~70.7%의 균질 포화율 모델에서는 유효 투과도가 동일하게 적용되면서 하이드레이트 해리면이 고르게 전파하려는 경향을 보였다.
- (4) UBGH2-6 박층 구조에 따라 하이드레이트 해리 유동 및 가스 생산 특성을 분석하였다. 박층의 일부 또는 전부가 모델에서 제외됨에 따라 층 두께와 하이드레이트 포화율의 복합적인 영향으로 인해 누적 가스 생산량이 15.7~60%까지 크게 감소하였다. 또한 박층의 분포범위가 증가할수록 공저압 영향 범위를 증가시켜 해리면 전파거리가 늘어나는 것으로 분석되었다. 가스 생산량에서 박층이 차지하는 비중을 고려했을 때, UBGH2-6 저류층 모델에서 박층은 필수로 포함되어야 한다.

박층에서 생산되는 가스생산량 비중 및 영향을 고려하였을 때, UBGH2-6 가스하이드레이트 생산 전략 수립에 있어 생산 목표층으로의 박층에 대한 보다 세밀한 규명이 필요함을 알 수 있다. 지질학적인 박층 구조의 존재 및 연결성에 대한 불확실성, 실험 및 현장자료와의 비교를 통한 포화율에 따른 유효 투과도 모델 및 감소지수에 대한 영향 등이 추가로 분석되어야 할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업(22-1143-1, GH 장기생산 대비 감압기반 생산효율 향상기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

References

Huang, L., Zheng, S., Wu, N., and Cheng, J., 2016. Analysis on geologic conditions affecting the performance of gas production from hydrate deposits, *Marine and Petroleum Geology*, 77, p.19-29.

Huh, D.G. and Lee, J.Y., 2017. Overview of gas hydrate R&D, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 54(2), p.201-214.

Kim, A.R., Kim, J.Y., Cho, G.C., and Lee, J.Y., 2018. Methane production from marine gas hydrate deposits in Korea: thermal-hydraulic-mechanical simulation on production wellbore stability, *Journal of Geophysical Research: Solid*

- Earth*, 123(11), p.9555-9569.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2019. *Gas hydrate exploration and production study*. KIGAM Report 19-1143, Daejeon, Korea, 450p.
- Kurihara, M., Sato, A., Ouchi, H., Narita, H., Masuda, Y., Saeki, T., and Fujii, T., 2009. Prediction of gas productivity from eastern Nankai trough methane-hydrate reservoirs, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 12(3), p.477-499.
- Lee, J., Ryu, B., Yun, T., Lee, J., and Cho, G., 2011. Review on the Gas Hydrate Development and Production as a New Energy Resource, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), p.689-696.
- Li, G., Li, X.S., Zhang, K., Li, B., and Zhang, Y., 2013. Effects of impermeable boundaries on gas production from hydrate accumulations in the Shenhu area of the South China sea, *Energies*, 6(8), p.4078-4096.
- Masuda, Y., Naganawa, S., and Ando, S., 1997. Numerical calculation of gas-production performance from reservoirs containing natural gas hydrates, *Proc. of the Western Regional Meeting*, SPE, Long Beach, California,
- Moon, Y.J., Shin, H.J., Lim, J.S., and Jang, W.Y., 2019. Numerical analysis of geomechanical behavior affected by depressurization conditions of gas hydrate production in the Ulleung Basin, East Sea, Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 56(1), p.53-61.
- Moridis, G. and Collet, T., 2003. Strategies for gas production from hydrate accumulation under various geologic conditions. LBNL-52568, *Proc. of the TOUGH symposium 2003*, Berkeley, California, p.1-8.
- Moridis, G.J. and Reagan, M.T., 2007. Strategies for Gas Production From Oceanic Class 3 Hydrate Accumulations. *Proc. of the 2007 Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, p.1-29.
- Moridis, G.J., Kim, J., Reagan, M.T., and Kim, S.J., 2014. System response during short- and long-term gas production from a gas hydrate deposit at the site of a planned field test in the Ulleung Basin of the Korean East Sea. *Proc. of the Offshore Technology Conference*, SPE, Houston, Texas, p.1-29.
- Park, K.P., 2008. Gas hydrate exploration: overview and status, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, 45(5), p.590-600.
- Ryu, B., Kim, G., Chun, J., Bahk, J., Lee, J., Kim, J., Yoo, D., Collett, T., Riedel, M., and Torres, M., 2012. *The second Ulleung basin gas hydrate drilling expedition 2 (UBGH2)*.
- Ryu, B.J., Collett, T.S., Riedel, M., Kim, G.Y., Chun, J.H., Bahk, J.J., Lee, J.Y., Kim, J.H., and Yoo, D.G., 2013. Scientific results of the Second Gas Hydrate Drilling Expedition in the Ulleung Basin(UBGH2), *Marine and Petroleum Geology*, 47, p.1-20.
- Shin, H.J., Kim, J.S., Lim J.S., and Kim, S.J., 2015. Numerical analysis of dissociation and flow behavior in gas hydrate bearing sediments for the productivity influence factors in the Ulleung Basin, East Sea of Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 52(5), p.500-510.
- Stone, H.L., 1970. Probability Model for Estimating Three-Phase Relative Permeability, *Transactions of AIME*, 249, p.214-218.
- Tomasini, J. and Stephen, K., 2020. Assessment of the potential for gas production from marine methane hydrate reservoirs by numerical simulation. *Proc. of the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, SPE, Bogota, Colombia, p.1-25.
- van-Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), p.892-898.
- Zheng, R., Li, S., and Li, X., 2018. Sensitivity analysis of hydrate dissociation front conditioned to depressurization and wellbore heating, *Marine and Petroleum Geology*, 91, p.631-638.



김 영 민

2012년 전남대학교 공과대학 지구시스템
공학과 공학사
2019년 전남대학교 대학원 에너지자원공
학과 공학박사

현재 한국석유공사 글로벌기술센터 저류공학팀 대리
(E-mail: ym.kim@knoc.co.kr)

이 원 석

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 책임연구원
(本學會誌 第57券 第6号 参照)