



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

중규모 가스하이드레이트 생산모사
실험시스템의 해리유동 전산 분석 연구

Numerical Analysis of Dissociation Behavior
in Mesoscale Gas Hydrate Production Experimental System



지도교수 임종세

2016년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

이 성 민

본 논문을 이성민의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 장 원 일 (인)

위 원 임 종 세 (인)

위 원 신 성 렬 (인)



2016년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract	v
1. 서 론	1
2. 가스하이드레이트 생산모사	6
2.1 가스하이드레이트 생산방법	6
2.2 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험	9
2.2.1 실험방법	9
2.2.2 실험결과	12
3. 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템 전산모델 구축	16
3.1 TOUGH+HYDRATE 개요	16
3.2 전산수치 모델 구성	19
3.3 전산수치 해석결과 비교·검증	24
4. 가스하이드레이트 함유 퇴적층 물성에 따른 민감도 분석	37
4.1 하이드레이트포화율 변화	38
4.2 절대유체투과도 변화	41
4.3 열전도도 변화	43
5. 결 론	45
참고문헌	46

List of Tables

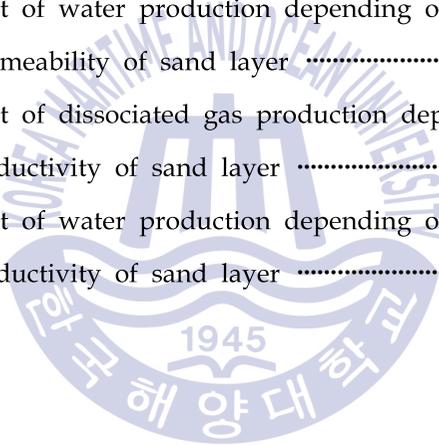
Table 1 Properties of sediments in high pressure cell	10
Table 2 Time and location when the resistance is increasing	15
Table 3 Input parameter of TOUGH+HYDRATE simulator	22



List of Figures

Fig. 1 Geologic environments of gas hydrate occurrence	2
Fig. 2 Amount of Methane hydrate in ocean regions	3
Fig. 3 The location and simply representation of the geological structure in the subsurface at the UBGH2-6 site	5
Fig. 4 Principle of gas hydrate dissociation	6
Fig. 5 Gas hydrate production methods	7
Fig. 6 Schematic diagram of mesoscale hydrate production simulation system	9
Fig. 7 Experiment result of produced gas volume	13
Fig. 8 Experiment result of produced water volume	13
Fig. 9 Differential pressure from the pressure measured at 5cm and 50cm	13
Fig. 10 Resistance measured in high pressure cell	14
Fig. 11 Schematic diagram of time and location when the resistance is increasing	15
Fig. 12 Schematic diagram of numerical simulation model considering the mesoscale gas hydrate production simulation system	21
Fig. 13 Specific heat of alumina	23
Fig. 14 Thermal conductivity of alumina	23
Fig. 15 Relative permeability curve for history matching the gas production	26
Fig. 16 Gas production of experiment and simulation results	27
Fig. 17 Water production of experiment and simulation results	28
Fig. 18 Spatial distribution of pressure during the depressurization	30
Fig. 19 Differential pressure between 5cm and 50cm	31
Fig. 20 Spatial distribution of temperature during the depressurization	32
Fig. 21 Spatial distribution of hydrate saturation during the depressurization	33

Fig. 22 Spatial distribution of gas saturation during the depressurization	34
Fig. 23 Gas saturation over height of cell at 25 hours	35
Fig. 24 Spatial distribution of mass fraction of inhibitor during the depressurization	36
Fig. 25 Simulation result of dissociated gas production depending on the hydrate saturation	39
Fig. 26 Simulation result of water production depending on the hydrate saturation	39
Fig. 27 Dissociated gas volume depending on the hydrate saturation	40
Fig. 28 Simulation result of dissociated gas production depending on the absolute permeability of sand layer	42
Fig. 29 Simulation result of water production depending on the absolute permeability of sand layer	42
Fig. 30 Simulation result of dissociated gas production depending on the thermal conductivity of sand layer	44
Fig. 31 Simulation result of water production depending on the thermal conductivity of sand layer	44



Numerical Analysis of Dissociation Behavior in Mesoscale Gas Hydrate Production Experimental System

Sung Min Lee

Department of Energy and Resources Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

With increasing energy demands and environment problems, gas hydrate may serve as a potentially important resources of future energy requirements. Gas hydrate is solid clathrate compound in which a large amount of methane is trapped with in a crystal structure of water. Depressurization method can be considered to the most productive and effective method for gas hydrate production because gas may be continuously produced.

There are many researches and expeditions to develop the gas hydrate in USA, Canada, China and Japan. In Korea, the first Ulleung Basin Gas Hydrate drilling expedition(UBGH1) was performed in 2007 and the second Ulleung Basin Gas Hydrate drilling expedition(UBGH2) was performed in 2010 at the locations that have high potential gas hydrate bearing sediments in Ulleung basin, East Sea of Korea. Based on this expeditions, numerical simulation has been performed by considering the experiment of the gas

hydrate production in core scale. However, it is limited to immediately apply to field production test using the result of core scale because the researches related to the productivity and stability are insufficient during the gas hydrate production. Therefore, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM) experimented with the Mesoscale Gas Hydrate Production Simulation Experimental System to solve this problems. It is necessary to analyze the results of the experiment with the numerical simulation for applying to field production test.

In this study, numerical simulation model, reflecting the Mesoscale production simulation system, has been made for the extension of the field applicability and verified by comparing experimental and simulation results. The parameters related to fluid flow are changed and simulation results of the dissociation behavior are compared to the experimental result. Also, sensitivity of the sediments properties has been analyzed to predict gas, water production and flow behavior by gas hydrate dissociation.

KEY WORDS: Gas Hydrate 가스하이드레이트; Depressurization Method 감압법; Mesoscale production simulation system; 중규모 생산모사 시스템.

1. 서 론

가스하이드레이트(gas hydrate)는 천연가스가 저온, 고압 조건에서 물 분자와 물리적으로 결합하여 형성된 고체 상태의 결정으로, 주 구성 성분인 메탄은 연소 시 석유, 석탄과 같은 일반적인 석유자원에 비해 상대적으로 이산화탄소를 적게 배출하는 친환경적인 특성을 가지고 있어 청정 에너지원으로 각광을 받고 있다(허대기, 2005). 가스하이드레이트는 대기압 조건에서 단위부피(1m^3)당 160m^3 부피의 가스를 포집하고 있으며, Fig. 1과 같이 심해저 퇴적층(deep ocean sediments) 및 영구동토지역(permafrost)과 같은 다양한 지질학적 구조에 부존되어 있는 것으로 알려져 있다(Boswell, 2011). 또한 일반적인 석유자원은 특정 국가에 편재하는 경향이 강하지만 가스하이드레이트는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 전 세계적으로 분포하며, 약 10조 톤에 이르는 양이 부존되어 있을 것으로 추정되고 있어 상업적인 생산이 가능할 경우 미래의 에너지자원으로 큰 역할을 할 것으로 기대되고 있다(Kvenvolden, 1998; Collett, 2002; 허대기, 2005).

가스하이드레이트의 상업적인 생산을 위하여 미국, 캐나다, 중국, 일본 등에서 탐사 및 개발과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 미국의 경우 알래스카(Alaska North Slope)와 멕시코 만(Gulf of Mexico, GOM)에 부존된 가스하이드레이트를 대상으로 장기 상업생산에 필요한 연구를 수행하고 있다(US DOE, 2006 and 2007). 캐나다는 2008년 북부 맥켄지 델타(Mackenzie Delta)의 말릭(Mallik) 지역에서 감압법을 적용해 6일 동안 가스를 생산한 바 있으며(Yamamoto et al., 2014), 중국은 2020년까지의 상업 생산을 위한 탐사 및 평가를 목표로 프로젝트를 수행하고 있다(Lu, 2015). 일본은 난카이 해역의 가스하이드레이트 생산을 위하여 MH21 프로젝트를 통해 부존량 평가 연구 및 운영, 생산기법 및 모델링 연구, 환경영향 평가 연구에 대해 진행하고 있으며(김아람 등, 2015), 2013년 세계 최초로 해저 가스하이드레이트로부터 가스 생산에 성공하였다(Yamamoto et al., 2014).

General schematic showing typical modes of gas hydrate occurrence relative to the geologic environment

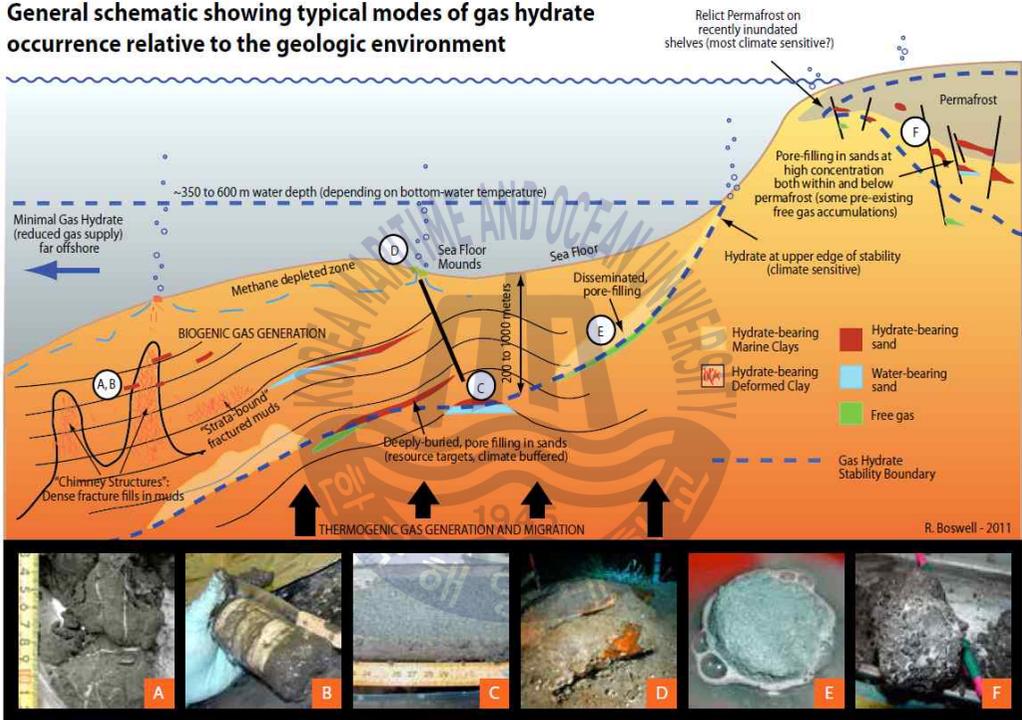


Fig. 1 Geologic environments of gas hydrate occurrence (Boswell, 2011)

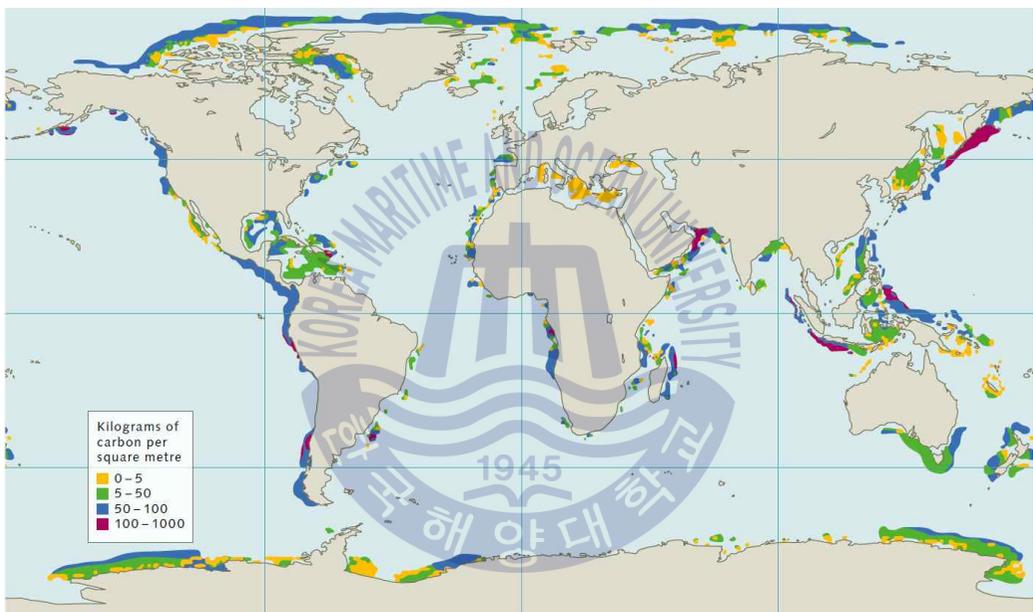
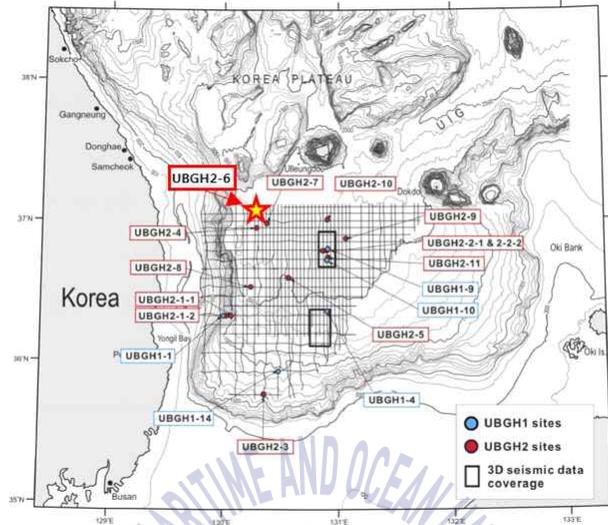


Fig. 2 Amount of Methane hydrate in ocean regions (Maribus, 2014)

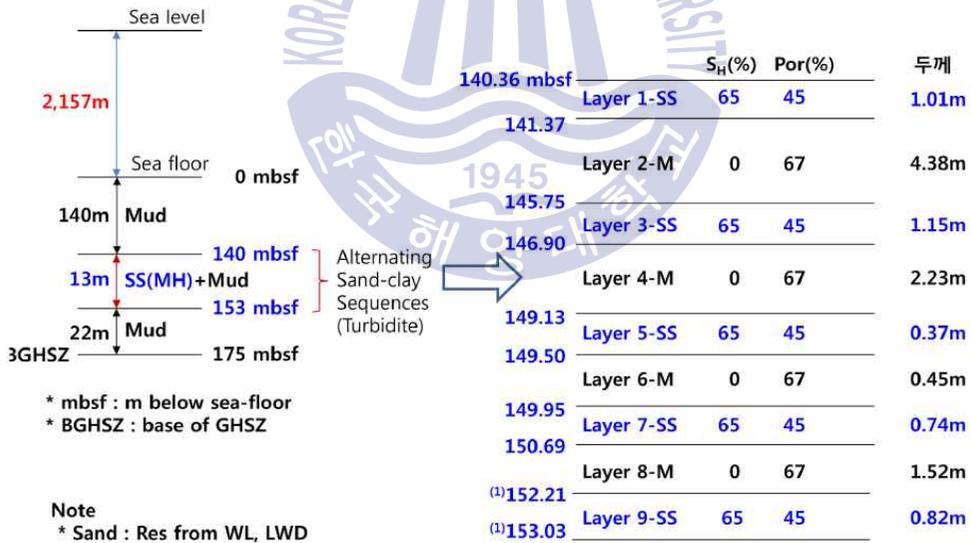
국내의 경우 동해 울릉분지에 약 6~8억 톤 이상의 가스하이드레이트가 부존되어 있을 것으로 추정하고 있으며(허대기, 2005), 2007년에 울릉분지 1차 시추지역인 UBGH1에서 시추작업이 수행되었고 가스하이드레이트 실물 채취에 성공하였다(KIGAM, 2008). 2010년에는 가스하이드레이트 부존량 평가와 현장 생산 시험 후보지 선정을 위한 목적으로 2차 시추지역인 UBGH2에서 시추작업이 수행되었으며(Lee et al., 2011), 시추공 자료를 바탕으로 Fig. 3과 같이 UBGH2-6에 대한 지층의 두께, 공극률, 하이드레이트포화율을 파악하였다(Moridis et al., 2014). 또한 가스하이드레이트 부존 퇴적층 내 유체의 유동을 파악하기 위한 코어 스케일의 실험결과를 바탕으로 현장 시험생산 후보지의 전산수치 모델을 구축함으로써 현장 적용성 확장을 위한 연구를 수행하였다(김지수 등, 2014).

그러나 가스하이드레이트 해리는 물질전달(mass transfer)과 열전달(heat transfer)이 복합적으로 작용하는 현상으로 코어 스케일에서는 열전달이 해리에 큰 영향을 미치지만 현장 스케일에서는 물질전달이 큰 영향을 미친다(Nagao, 2012). 따라서 코어 스케일에서의 연구 결과를 곧바로 가스하이드레이트 현장 시험생산에 적용하는 것은 한계가 있다. 최근 이러한 문제점을 극복하고자 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)에서 동해 울릉분지 환경을 모사한 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템에서 연구를 수행하였으며(KIGAM, 2014), 현장 시험생산 후보지의 가스하이드레이트 개발·생산 계획 수립을 위해 실험시스템 내 다양한 생산조건에서 해리거동을 파악하는 것이 필요하다.

따라서 이 연구에서는 현장 적용성 확장을 위해 수행된 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템에 대한 전산수치 모델을 구축하여 유체의 유동과 관련된 변수를 변화시켜 실험결과와 전산수치 해석결과를 비교·검증하고자 하였다. 또한 다양한 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 물성 변화에 따른 민감도 분석을 수행하여 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템 내 해리거동을 파악하고자 하였다.



(a) location



(b) geological structure

Fig. 3 The location and simply representation of the geological structure in the subsurface at the UBGH2-6 site (Moridis et al., 2014)

2. 중규모 가스하이드레이트 생산모사

2.1 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험 생산방법

가스하이드레이트는 Fig. 4와 같이 저류층의 온도, 압력조건이 가스하이드레이트 안전영역(gas hydrate stability zone)에 있을 경우 하이드레이트 상태를 유지하지만 저류층 조건이 가스하이드레이트 해리영역(gas hydrate dissociation zone)으로 변할 경우 하이드레이트의 해리가 발생하여 가스의 생산이 가능하다. 따라서 가스하이드레이트로부터 가스를 생산하는 방법은 크게 3가지로 구분할 수 있으며, 열 주입법(thermal stimulation), 억제제 주입법(inhibitor injection), 감압법(depressurization)이 있다(Fig. 5).

열 주입법은 가스하이드레이트 저류층에 열을 주입하여 가스하이드레이트 부

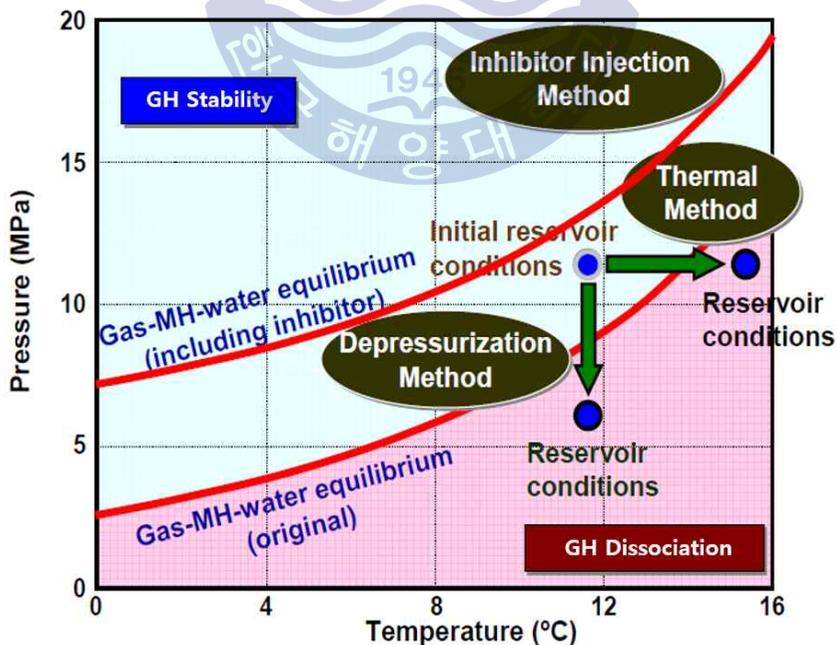


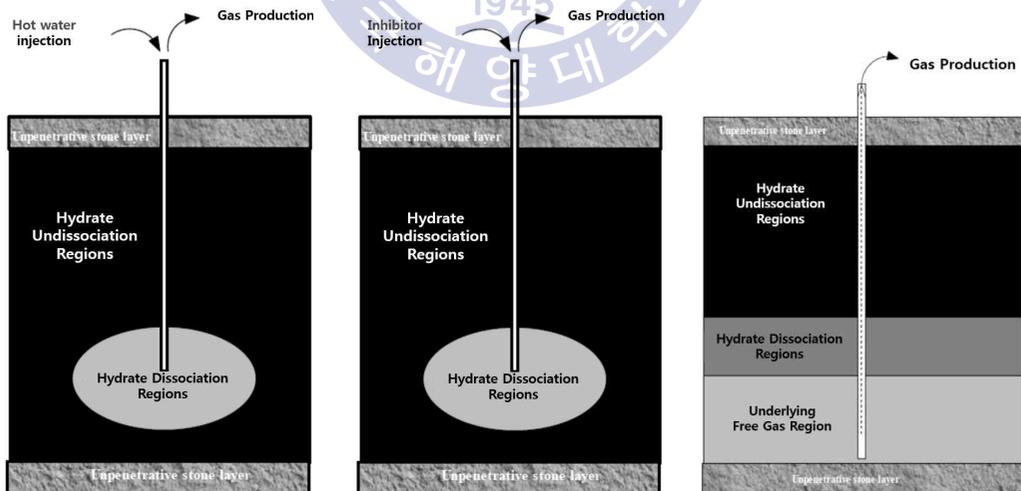
Fig. 4 Principle of gas hydrate dissociation (Kurihara et al., 2011)

존 퇴적층의 온도를 평형조건보다 높게 유지시킴으로써 하이드레이트를 해리시키는 방법이다. 열을 주입하는 매체로는 증기, 열수, 전기열 등이 있으며, 열을 공급하기 위해 많은 에너지가 필요하다. 또한 심해저 퇴적층에 부존되어 있는 가스하이드레이트의 경우, 열이 저류층에 도달하기 전에 해수에 의한 손실이 발생할 가능성이 있다.

억제제 주입법은 메탄올, 에틸렌 글리콜(ethylen glycol)과 같은 화학첨가제나 염화나트륨이 함유된 물을 주입하여 하이드레이트의 평형조건을 변화시켜 해리시키는 방법이다. 이 방법은 추운지역에서 파이프라인을 통하여 가스 또는 컨덴세이트를 공급할 때, 가스하이드레이트에 의하여 파이프라인이 막히는 현상을 방지하기 위해서 사용되었던 기술을 응용한 것이다.

감압법은 가스하이드레이트 저류층의 압력을 평형조건보다 낮게 유지하여 하이드레이트를 해리시켜 가스를 생산하는 방법으로 다른 생산 방법과 비교하였을 때 적용 원리가 매우 간단하다. 또한 열 주입법 및 억제제 주입법과 달리 생산을 중단하지 않고 지속적으로 가스 생산이 가능하여 가장 경제적인 방법으로 알려져 있다(Moridis and Reagan, 2007; Boswell and Collett, 2011).

일본 난카이 해역에서 ESP(Electrical Submersible Pump)를 이용하여 13.5MPa의 저류층의 압력을 5MPa의 공저압(Bottom Hole Pressure, BHP)까지



(a) Thermal Stimulation (b) Inhibitor Injection (c) Depressurization

Fig. 5 Gas hydrate production methods (Liu et al., 2012)

감압을 하여 시험생산에 성공한 사례가 있다(Yamamoto et al., 2014). 특히, 국내 가스하이드레이트 시험생산 후보지는 난카이 해역과 같이 심해저 환경으로 일본에서 수행한 감압법을 적용할 계획이다. 따라서 중규모 생산모사 실험에서 가스하이드레이트 생산방법은 감압법이 적용되었으며, 실험시스템 내 감압으로 인한 가스하이드레이트 해리거동을 파악하고자 한다.



2.2 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험

2.2.1 실험방법

중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템은 동해 가스하이드레이트 함유 퇴적층 조건을 모사하였으며, 시험생산 시 퇴적층의 안정성과 가스하이드레이트 산출능력을 파악하기 위해 제작되었다(KIGAM, 2014). 고압셀의 최대 허용압력은 22MPa이며, 퇴적시료가 충전되는 내부는 Fig. 6과 같이 직경 100cm, 높이 155cm로 구성되어 있다. 고압셀 내부의 압력, 저항 변화 등을 측정할 수 있는 센서가 설치되어 있으며, 온도유지 장치를 사용하여 퇴적층 이외 실험시스템 구간에서 하이드레이트가 생성되는 현상을 방지하기 위해 일정한 온도조건(15°C)으로 유지되었다. KIGAM (2014)은 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험을 퇴적시료 충전, 하이드레이트 생성, 감압 적용 순으로 실험을 진행하였으며, 가스하이드레이트의 해리로 발생하는 가스 및 물 생산량을 측정하였다.

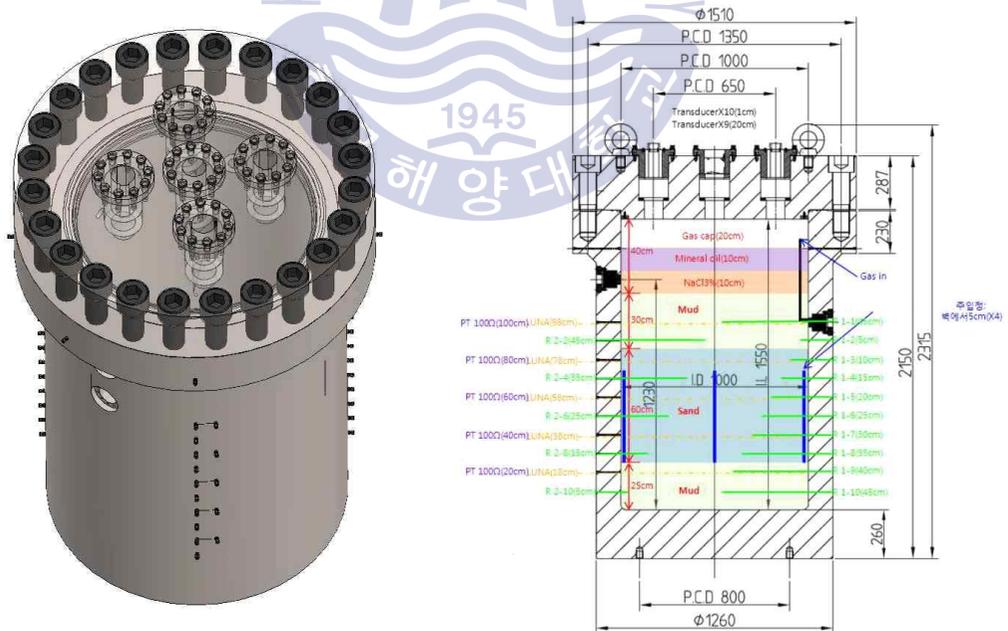


Fig. 6 Schematic diagram of mesoscale gas hydrate production experimental system (KIGAM, 2014)

① 퇴적시료 충전

감압법을 이용하여 가스하이드레이트를 생산할 경우 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 입자크기에 따라 해리거동이 다르게 나타나는 사례가 있었다(Li and Zhang, 2011; Haligva et al., 2010). 따라서 중간 사질층은 가스하이드레이트 함유 사질퇴적층인 UBGH2-6 시추공 시료의 입도분포를 모사하여 충전되었으며, 알루미나(Al_2O_3)가 주성분인 연마제 F120, F150, F180을 각각 8:1:1의 비율로 혼합하여 사용되었다. 점토층은 벤토나이트(Bentonite)가 주성분인 보령점토로 충전되었으며, 현장 퇴적층은 점토-사질층의 교호(Alternate layers) 상태인 것을 모사하기 위해 하부 점토층(25cm), 중간 사질층(60cm), 상부 점토층(30cm)으로 구성되었다. 각 층의 규격 및 공극부피, 공극률은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of sediments in high pressure cell(KIGAM, 2014)

	Inner diameter (cm)	Thickness (cm)	Volume (cm^2)	Pore Volume (cm^3)	Porosity (%)
Overburden (mud)	100	30	235,620	126,300	53.6
Middle (sand)		60	471,240	217,240	46.1
Underburden (mud)		25	196,350	104,460	53.2

② 가스하이드레이트 생성

중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템에 NaCl 3% 염수로 포화된 상태에서 20.1MPa의 압력으로 상승시켜 가스하이드레이트를 생성시켰다. 가스하이드레이트로 변환된 염수는 물의 이온배제현상(ion exclusion phenomena)에 의해 기존 물의 염도가 지속적으로 증가하여 추가적인 하이드레이트 형성을 방해한다. 이러한 현상을 방지하기 위해 가스하이드레이트 생성과정에서 증류수를 주입하여 염도를 감소시켰으며, 그 결과 사질층의 염도변화에 따른 예측 하이드레이트포화율은 식(1)을 이용하여(Spangenberg and Kulenkampff, 2006) 약 25.5%로 산출되었다.

$$M_{w-h}(t) = m_0 \left(1 - \frac{c_0}{c(t)} \right) \quad (1)$$

$$S_h = \frac{m_h}{V_{por} \rho_h}$$

- m_{w-h} : mass of water consumed in hydrate formation at a given time t [s]
- m_0 : the mass of water present at the very beginning of the experiment [kg]
- c_0 : NaCl concentration at the very beginning of the experiment [%]
- $c(t)$: NaCl concentration at a given time t [%]
- m_h : mass of produced hydrate [kg]
- V_{por} : the sample's pore volume [m³]
- S_h : hydrate saturation
- ρ_h : density of hydrate [kg/m³]

③ 감압 적용

가스하이드레이트가 생성된 후 고압셀의 온도 및 압력이 각각 15.2°C, 20.1MPa로 안정된 상태에서 세 단계에 걸쳐 감압이 진행되었다. 1차 감압은 20.1MPa에서 시작하여 10.1MPa까지 -0.42MPa/hr의 속도로 감압되었으며, 2차 감압은 10.1MPa에서 7.6MPa까지, 3차 감압은 7.6MPa에서 대기압까지 동일한 감압속도로 감압이 적용되었다. 감압이 적용되는 동안 고압셀로부터 배출되는 가스와 물은 가스-물 분리기(separator)를 이용해 분리하여 측정되었다.

2.2.1 실험결과

가스하이드레이트의 해리에 의한 영향을 확인 할 수 있는 1차 감압(1st phase)에서 분리기를 통해 분리된 가스 및 물 생산량과 고압셀에 설치된 센서를 통해 측정된 압력 및 저항의 결과는 다음과 같다(KIGAM, 2014).

① 가스 및 물 생산량

실험에서 생산된 가스는 가스하이드레이트 해리로 발생하는 해리가스와 물에 용존되어 있는 메탄이 용해도(solubility)의 변화에 의해 가스 상으로 분리되어 발생하는 용존가스로 분류할 수 있었다. 1차 감압기간 동안 생산된 가스와 물은 Fig. 7~8과 같으며, 감압시작과 동시에 물 생산량이 증가하는 것이 확인되었다. 총 가스 생산량 또한 증가되었으며, 압력감소로 인해 물에 용존되어 있는 가스가 생산된 것으로 사료되었다. 이후 물 생산량은 일정하게 유지되어 총 190L의 물이 생산되었으며, 가스 생산량은 감압시작 22시간부터 가스하이드레이트 해리가 발생되어 총 2,328L의 가스가 생산되었다.

② 압력

1차 감압기간 동안 측정된 고압셀의 압력은 Fig. 7~8의 검은색선과 같이 초기압력에서 10.1MPa까지 -0.42MPa/hr 의 속도로 감압이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 또한 고압셀의 높이에 따라 반경 5cm와 50cm지점에서 측정된 압력의 차이를 나타낸 Fig. 9에서 압력 차이가 최대 $\pm 0.02\text{MPa}$ (3psi)인 것을 확인할 수 있었으며, 이는 감압 생산 시 생산량 저하를 야기하는 가스하이드레이트 재형성에 의한 막힘 현상이 발생하지 않은 것으로 판단할 수 있었다.

③ 저항

고압셀에 장착된 비저항 센서는 반경, 높이에 따라 설치가 되어 있으며, 1차 감압기간 동안 산출된 저항값은 Fig. 10과 같다. 퇴적층 내 가스하이드레이트 해리에 의해 가스가 발생하게 되면 저항값이 급격히 증가하게 되었으며, 그 시점과 위치는 Table 2와 Fig. 11과 같다. 상부에서 하부로 저항값의 증가가 전과 되는 거동을 보였으며, 이는 전체 사질층에서 가스는 중력분리(gravity segregation)에 의해 상부이동이 원활히 이루어지는 것으로 사료되었다.

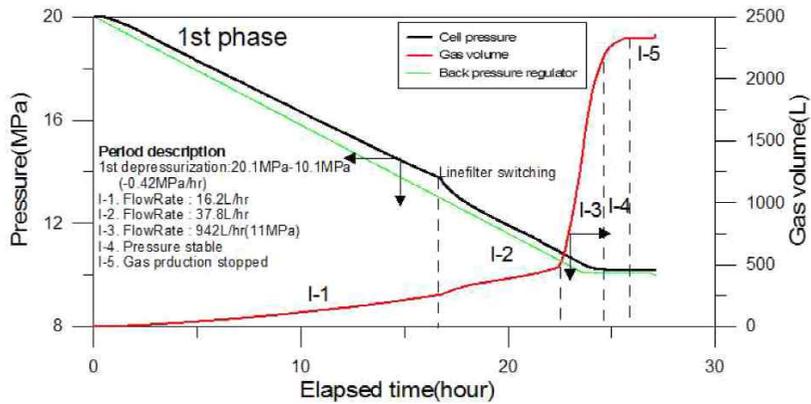


Fig. 7 Experiment result of produced gas volume (KIGAM, 2014)

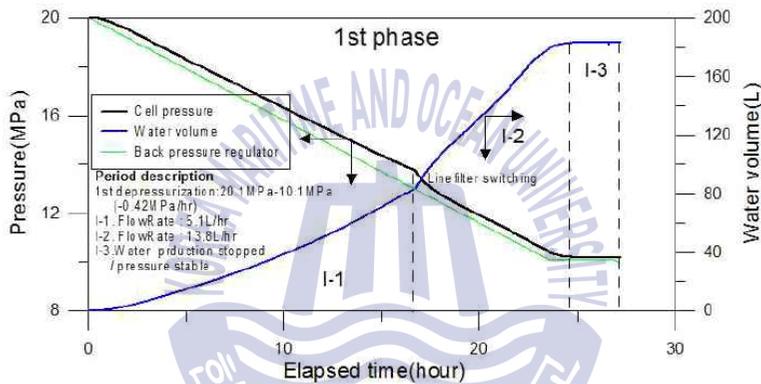


Fig. 8 Experiment result of produced water volume (KIGAM, 2014)

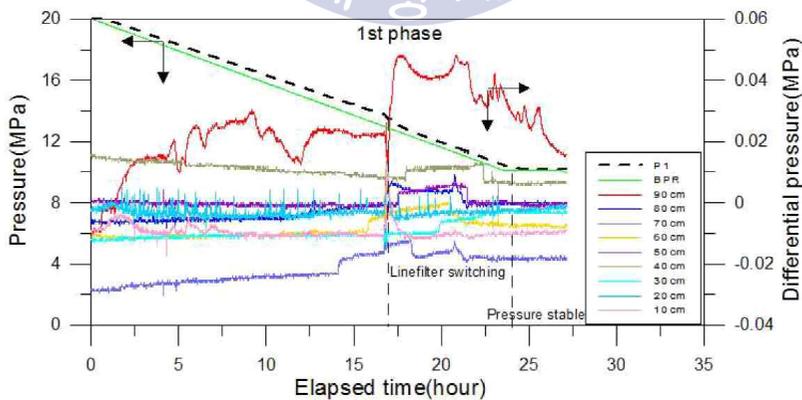
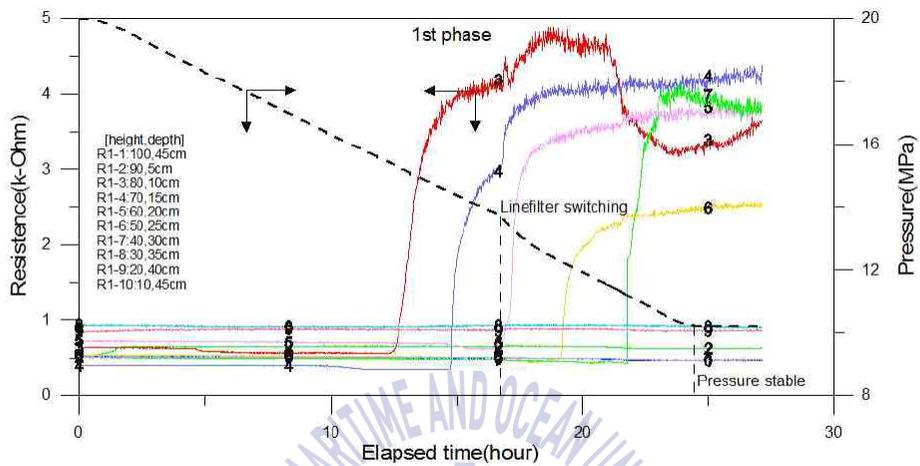
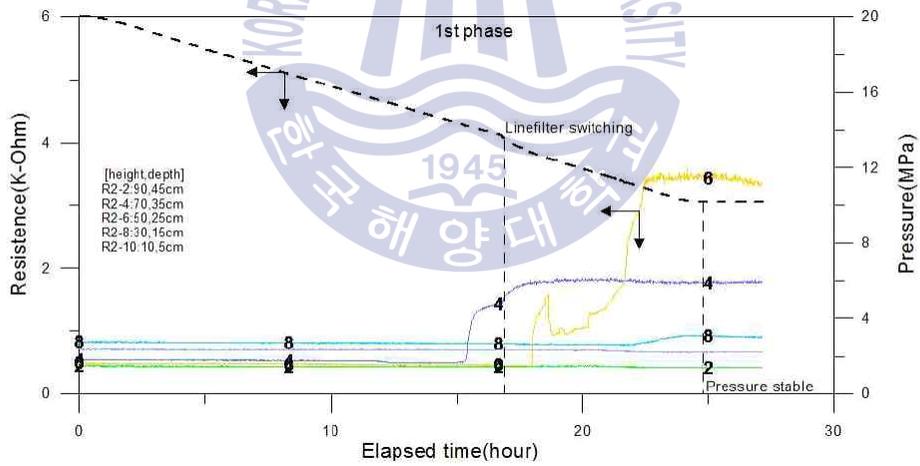


Fig. 9 Differential pressure from the pressure measured at 5cm and 50cm (KIGAM, 2014)



(a) Set #1



(b) Set #2

Fig. 10 Resistance measured in high pressure cell (KIGAM, 2014)

Table 2 Time and location when the resistance is increasing (KIGAM, 2014)

Middle(sand)	Underburden(mud)
12.4hr: height=80cm, radius=40cm 14.7hr: height=70cm, radius=35cm 16.7hr: height=60cm, radius=30cm 18.0hr: height=50cm, radius=25cm 21.7hr: height=40cm, radius=20cm	22.0hr: height=30cm, radius=15cm

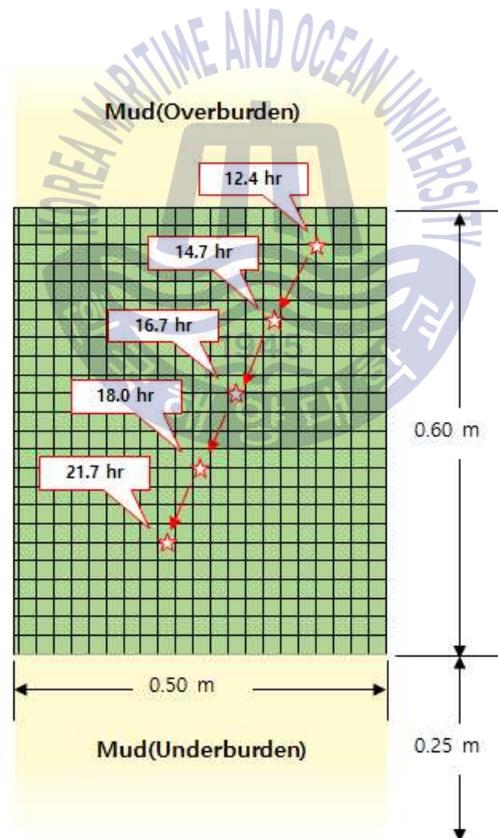


Fig. 11 Schematic diagram of time and location when the resistance is increasing

3. 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템 전산모델 구축

3.1 TOUGH+HYDRATE 개요

이 연구에서는 미국 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 개발한 TOUGH+HYDRATE 전산수치 해석 프로그램을 사용하였으며, 이는 다공성 매질 및 균열체 내에서의 다상·다성분 유체 유동의 모사가 가능한 TOUGH 전산수치 해석 코드를 가스하이드레이트 함유 퇴적층에서 메탄가스 생산거동의 모사가 가능하도록 수정 및 보완한 모듈이다.

TOUGH+HYDRATE는 4종류의 조성(H_2O , CH_4 , CH_4 -hydrate, water soluble inhibitors; salt 또는 alcohols)과 4종류의 상(gas, aqueous liquid, ice, hydrate)에 대하여 적용이 가능한 전산모델이다. 심해저 퇴적층 및 영구동토층에서 온도 변화에 따른 가스하이드레이트 가스 해리(non-isothermal gas release), 수화반응(hydrate reaction), 유체 유동(flow of fluids), 수력학적(hydraulic) 및 열적(thermal) 거동, 열역학적(thermodynamic) 거동의 모델링이 가능하다. TOUGH+HYDRATE를 이용할 경우 가스하이드레이트 해리와 형성을 유발하는 압력, 온도, 억제제의 변화에 따라 지층의 열역학적 특징(압력, 온도, 포화율, 억제제의 농도)의 예측이 가능하다. 가스하이드레이트 형성과 해리에 대한 모델링은 평형 모델(equilibrium model)과 동적 모델(kinetic model)로 구현할 수 있으며, 가스하이드레이트 해리로 인한 상변화 시 일어나는 급격한 열역학적 변화를 모사할 수 있다. 시스템의 열역학적 상태에 따라 가스하이드레이트로부터 가스 생산량은 식(2)로 정의할 수 있다(Demirbas, 2010).

$$CH_4 \cdot N_m H_2O = CH_4(gas) + N_m H_2O(liquid \text{ or } ice) \quad (2)$$

여기서 N_m 은 Hydrate Number로 격자구조의 가스하이드레이트를 생성함에 있어 가스 한 분자에 필요한 물 분자 수를 의미하며, 일반적으로 메탄가스는 6의 값을 갖는다. 또한 전산수치 해석 프로그램에서 격자 구성에서 물질 평형 및 열평형의 관계는 유한차분법(finite difference method)을 이용한 식(3)과 같이 정의된다. 기체와 액체상에 관련된 질량유속 항(mass flux term)은 식(4)와 같이 Darcy 법칙에 의해 모사가 가능하다(Pruess et al., 1999).

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^K dV = \int_{\Gamma_n} F^K \cdot n d\tilde{A} + \int_{V_n} q^K dV \quad (3)$$

- V, V_n : volume, volume of subdomain n [m^3]
 M^K : mass accumulation term of component K [kg/m^3]
 A, Γ_n : surface area, surface area of subdomain n [m^2]
 F^K : Darcy flux of component K [$kg/m^2 \cdot s$]
 n : inward unit normal vector
 q^K : source/sink term of component K [$kg/m^3 \cdot s$]
 t : time [s]

$$F^K = \sum_{\beta=1, \dots, N_\beta} F_\beta^K, \quad F_\beta^K = X_\beta^K F_\beta, \quad K \equiv 1, \dots, N_K \quad (4)$$

$$F_\beta = -k \frac{k_{r\beta} \rho_\beta}{\mu_\beta} (\nabla P_\beta - \rho_\beta g)$$

- X_β^K : mass fraction of component K in phase β [kg/kg]
 k : absolute permeability [m^2]
 $k_{r\beta}$: relative permeability of the aqueous phase [dimensionless]
 μ_β : viscosity of the aqueous phase [$Pa \cdot s$]
 P_β : pressure of the aqueous phase [Pa]
 g : gravitational acceleration [m/s^2]

또한 복잡한 가스하이드레이트 해리를 모사하기 위해 TOUGH+HYDRATE에서는 Peng-Robinson 상태 방정식(Peng and Robinson, 1976)을 통해 가스 상의 성분을 다양한 온도와 압력 범위에서 압축률(compressibility), 밀도(density), 순수, 혼합 기체의 엔탈피 및 내부 에너지를 계산한다. 이외에도 Fuller et al. (1969)과 Chung et al. (1988)의 binary diffusivities, Riazi and Whitson (1993)의 가스 점성도와 열전도도를 계산할 수 있는 식을 이용할 수 있다. 이러한 상에 대한 고려 이외에도 가스하이드레이트 함유 퇴적층에서의 공극률과 유체투과도의 변화에 대한 중요 부분을 설정하여 전산수치 해석이 가능하다. 공극 내의 유체가 고체화 현상 또는 화학적 침전이 발생하여 고체상(solid phase)이 다공성 매질에 침전될 때 매질의 유체 거동 현상이 달라지며, 다공질 매질 내에 고체 물질의 침전으로 인해 유체의 포화율이 낮아지게 되어 유체투과도가 감소하게 된다.



3.2 전산수치 모델 구성

이 연구에서 사용한 전산수치 모델은 중규모 가스하이드레이트 생산모사 시스템의 모양과 유동의 흐름을 반영한 원통형(cylindrical) 모델로 Fig. 12와 같이 구심을 중심으로 한쪽 면을 모사하였다. 전산수치 모델은 실험시스템에 충전된 퇴적층과 동일한 두께인 115cm로 설정하였으며, 실험시스템 내 퇴적층 상부에 있는 자유가스 및 염수를 제외한 상부 점토층(30cm), 중간 사질층(60cm), 하부 점토층(25cm)으로 구성하였다. 격자 시스템은 가스하이드레이트가 부존되어 있는 사질층의 변화 양상을 효율적으로 나타내기 위해 점토층보다 사질층의 격자 크기를 작게 설정하였다. 생산정의 직경은 실험시스템과 동일한 2cm로 설정하였으며, 유체는 사질층을 통해 유입이 되어 생산되도록 모사하였다. 고압셀 내 온도를 유지하기 위한 순환시스템은 격자 시스템의 바깥경계에 가상 격자를 만들어 전산수치 모델을 구축하였으며, 전산수치 모델 구성에 필요한 입력값은 Table 3과 같다.

초기조건은 감압을 적용하기 전 고압셀의 조건을 반영하여 온도는 15.2°C로 입력하였으며, 실험시스템 내 압력은 정수압(hydrostatic pressure)을 따르므로 20.1MPa을 기준으로 식(5)를 통해 각 격자에 압력을 입력하였다.

$$P = P_o + \rho_f g h \quad (5)$$

- P : pressure [Pa]
- P_o : reference Pressure [Pa]
- ρ_f : fluid density [kg/m^3]
- g : gravity [m/s^2]
- h : depth [m]

격자에 대한 물성을 입력하기 위하여 생산모사 실험에서 측정된 자료를 이용하여 공극률 및 하이드레이트포화율을 입력하였다. 또한 상·하부 점토층의 절대유체투과도(absolute permeability), 상대유체투과도(relative permeability), 밀도(density), 비열(specific heat), 열전도도(thermal conductivity)는 Moridis et al. (2014)이 사용한 동해 울릉분지의 물성을 반영하였다. 사질층의 경우 절대유체투과도는 측정된 실험값인 12,500md를 사용하였으며, 밀도, 비열, 열전도도는 알루미나(Al_2O_3)의 물성을 바탕으로 설정하였다. 그러나 비열과 열전도도는 Fig. 13~14와 같이 온도에 따라 변하는 특성이 있으므로 식(6)~(7)을 이용하여 물성값을 산출하였다(Touloukian and Buyco, 1970; Morrell, 1987). 또한 열전도도의 경우 사질층의 공극 내 포함되어 있는 염수, 가스에 따라 변하므로 가중산술 평균으로 계산하여 입력하였다.

$$\lambda = 5.5 + 34.5 \exp\{-0.0033(T - 273)\} \quad (6)$$

$$C_p = 1.0446 + 0.0001742 \times T - 0.0002796 \times T^{-2} \quad (7)$$

- λ : thermal conductivity [W/mK]
- C_p : specific heat [J/gK]
- T : Temperature [K]

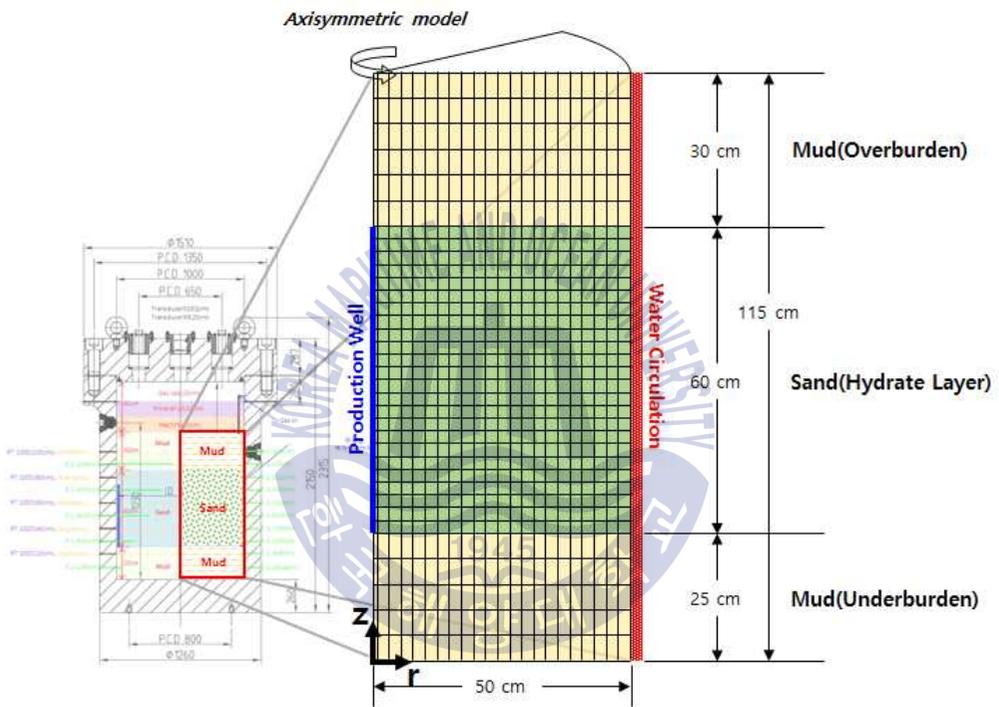


Fig. 12 Schematic diagram of numerical simulation model considering the mesoscale gas hydrate production simulation system

Table 3 Input parameter of TOUGH+HYDRATE simulator

Parameter	Input value		
	Overburden (mud)	Middle (sand)	Underburden (mud)
Porosity (%)	53.60	46.10	53.20
NaCl concentration (%)	3.00	2.31	3.00
GH saturation (%)	0.0	25.5	0.0
Absolute permeability (md)	0.21	12,500	0.21
Rock grain density (kg/m ³)	2630	3900	2630
Thermal conductivity of dry rocks (W/mK)	1.00	20.67	1.00
Thermal conductivity of fully saturated rocks (W/mK)	1.00	20.93	1.00
Rock grain specific heat (J/kg°C)	800	758	800
Initial pressure (MPa)	20.10		
Initial temperature (°C)	15.20		

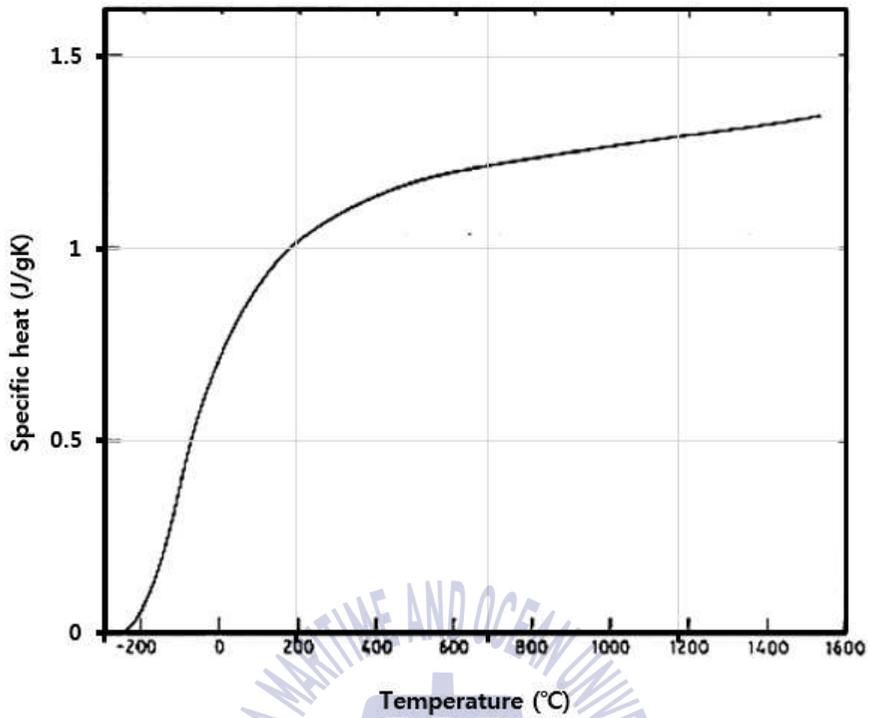


Fig. 13 Specific heat of alumina (Touloukian and Buyco, 1970)

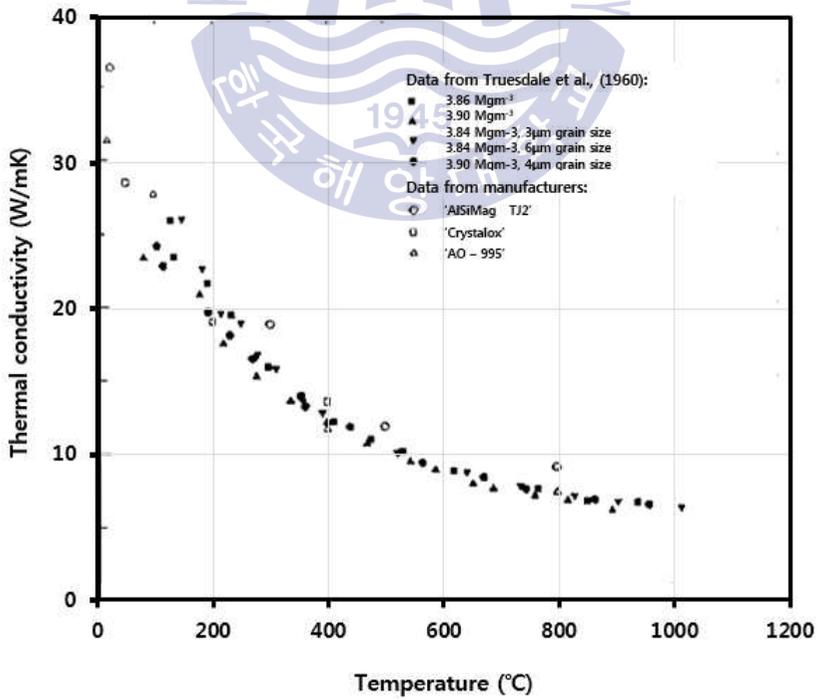


Fig. 14 Thermal conductivity of alumina (Morrell, 1987)

3.2 전산수치 해석결과 비교·검증

감압은 초기 압력(20.1MPa)에서 대기압까지 -0.42MPa/hr 속도로 적용하여 전산수치 해석을 수행하였으며, 중규모 가스하이드레이트 생산 모사 실험에서 1차 감압기간의 결과와 비교하여 전산수치 모델을 검증하고자 하였다. 이를 위해 TOUGH+HYDRATE를 활용하여 퇴적층 내 유체의 유동과 관련이 있는 사질층의 상대유체투과도를 변화시켜 실험결과와 전산수치 해석결과를 비교·검증을 하였다. 물의 상대유체투과도의 경우 식(8)과 같은 van Genuchten-Mualem 모델을 사용하였으며(Mualem, 1976; van Genuchten, 1980), 가스의 경우 식(9)과 같은 Modified Stone 모델을(Stone, 1970)을 사용하였다.

$$S^* = \frac{S_A - S_{irA}}{S_{mxA} - S_{irA}}$$

$$k_{rA} = \begin{cases} \sqrt{S^*} \{1 - (1 - [S^*]^{1/\lambda})^\lambda\}^2 & S_A < S_{mxA} \\ 1 & S_A \geq S_{mxA} \end{cases} \quad (8)$$

$$0 \leq k_{rA} \leq 1$$

- k_{rA} : relative permeability for aqueous
- S_A : saturations for aqueous
- S_{irA} : irreducible aqueous saturations
- S_{mxA} : maximum aqueous saturations
- λ : parameter of van Genuchten

$$k_{rG} = \left[\frac{S_G - S_{irG}}{1 - S_{irA}} \right]^{n_G} \quad (9)$$

$$0 \leq k_{rG} \leq 1$$

- k_{rG} : relative permeability for gas
 S_G : saturations for gas
 S_{irA}, S_{irG} : irreducible aqueous and gas saturations
 n, n_G : exponent

실험을 통해 측정된 물과 가스의 상대유체투과도 값을 참조하여 상대유체투과도를 설정하였으며, Fig. 15와 같은 상대유체투과도 조건으로 전산수치 해석을 수행하였다. 그 결과 1차 감압기간 동안 중규모 생산모사 실험에서 총 가스 및 용존가스 생산량이 유사한 양상을 보이는 것을 확인하였으며, 가스하이드레이트 해리로 발생하는 해리가스는 약 20시간부터 생산되어 총 2,259L의 가스가 생산되었다(Fig. 16(a)). 이는 실험에서 측정된 가스 생산량 2,325L와 비교하였을 때 오차 7.18%의 유사한 값을 보이며, 동일한 감압속도로 대기압까지 감압하여 전산수치해석을 수행한 결과 11,232L의 가스가 생산이 되었다(Fig. 16(b)).

또한 동일한 조건에서 Fig. 17과 같이 1차 감압기간 동안 물 생산량은 72L로 실험에서 측정된 물 생산량 190L보다 작은 값을 보이며, 대기압까지 감압한 결과 165L의 물이 생산되었다. 퇴적층에서 가스는 물보다 유동성이 좋아 가스하이드레이트 해리가 진행되는 20~42시간동안 가스의 생산이 이루어짐에 따라 물의 생산이 감소한 것을 확인하였다. 물 생산량의 경우 실험결과와 전산수치 해석결과의 차이가 나타나는 것은 중규모 실험시스템 내 염수층이 물의 생산에 영향을 미친 것으로 사료된다.

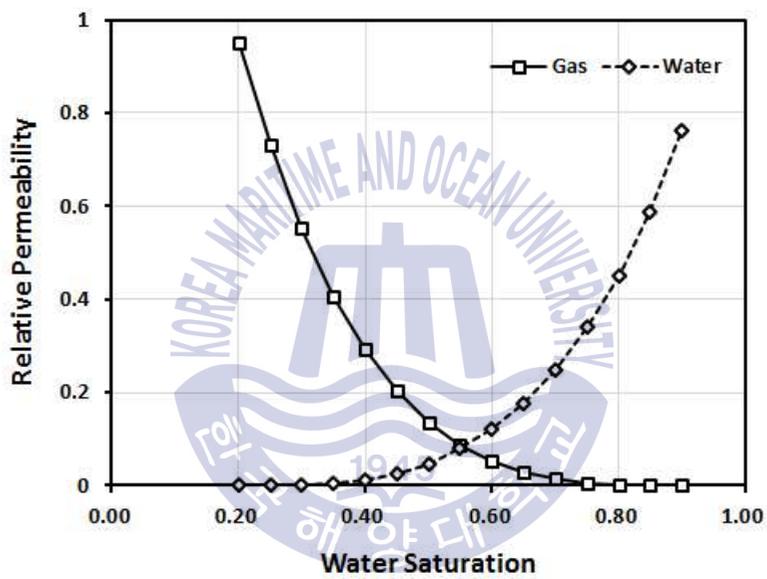
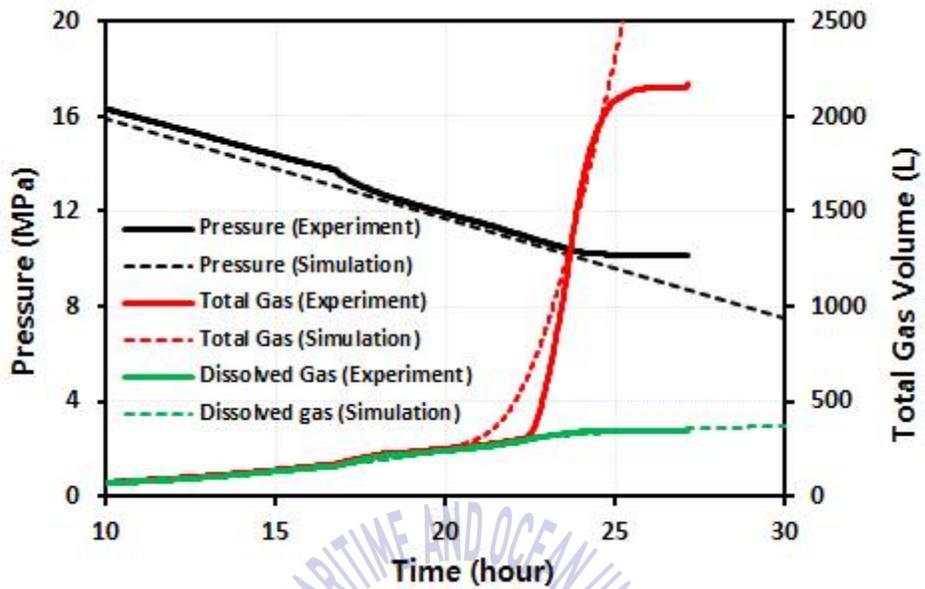
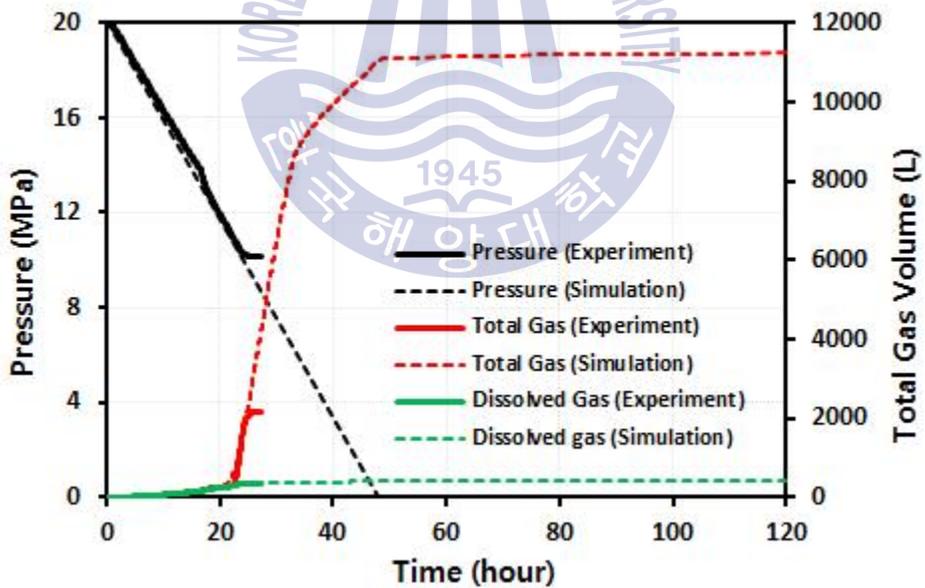


Fig. 15 Relative permeability curve for history matching of the gas production

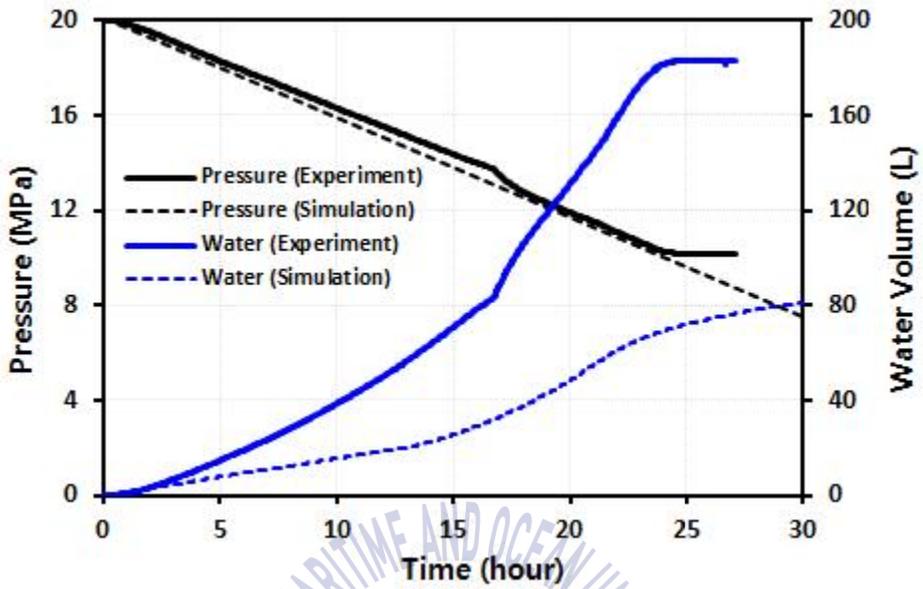


(a) 1st phase

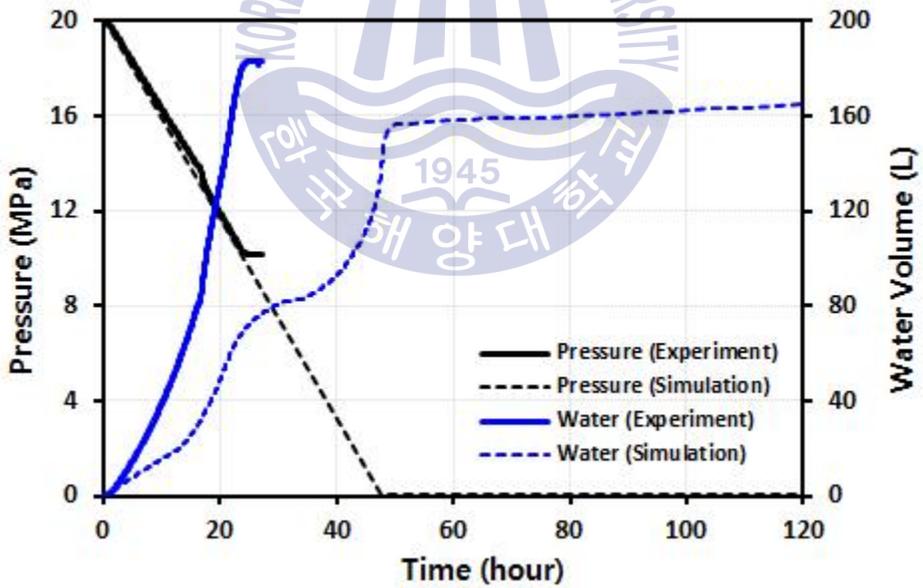


(b) total period

Fig. 16 Gas production of experiment and simulation results



(a) 1st phase



(b) total period

Fig. 17 Water production of experiment and simulation results

동일한 조건에서 도출된 고압셀 내의 압력분포는 Fig. 18과 같이 반경방향으로 확대 전파되는 양상이 아닌 전체적으로 동일하게 압력이 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 19는 반경 5cm지점과 50cm지점에서의 차압을 전산수치 해석결과를 통해 산출하여 나타내었으며, 실험에서 측정된 차압은 압력측정 센서의 오차보다 작은 값으로 고려하였을 때 차압의 절대값에 차이가 있지만 약 13시간 이후 증가하는 경향은 동일하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

또한, 고압셀 내 온도분포는 Fig. 20과 같으며, 사질층에서 감압으로 인한 가스하이드레이트 해리로 20시간부터 온도가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 가스하이드레이트 해리가 발생 할 때 흡열반응으로 해리가 진행되는 32시간 까지 온도가 감소되는 것을 볼 수 있으며, 34시간부터 온도유지를 위한 순환시스템에 의해 고압셀의 온도가 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.

Fig. 21은 하이드레이트포화율을 나타낸 것으로 14시간 이후 중간 사질층과 상하부의 점토층의 경계에서 하이드레이트포화율이 감소한 것을 볼 수 있으며, 감압으로 인하여 가스하이드레이트는 고압셀의 바깥경계부터 해리가 진행되는 것을 볼 수 있다. 또한, 가스하이드레이트 해리로 인한 가스포화율은 Fig. 22와 같으며, 하이드레이트포화율 결과와 같이 14시간부터 해리가 되어 가스가 발생하였으나 생산정까지 유동이 발생하기 위해 4% 이상의 가스포화율이 필요하여 약 20시간부터 해리가스가 생산된 것으로 파악된다. 또한 하이드레이트포화율과 동일하게 고압셀의 바깥경계부터 가스포화율이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 고압셀의 높이에 따른 가스포화율을 나타낸 Fig. 23에서 사질층의 상부에 가스포화율이 높은 것으로 실험에서 측정된 저항 결과와 같이 중력분리현상으로 해리가스의 상부이동이 원활이 이루어지고 있는 것으로 파악된다. 또한 염소질량분율의 경우 Fig. 24와 같으며, 사질층의 바깥경계부터 하이드레이트의 해리로 발생하는 물에 의하여 염소질량분율이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이를 통해 고압셀의 전체 압력은 일정하게 감소하였으나 고압셀의 온도를 일정하게 유지하기 위한 순환시스템으로 고압셀의 바깥경계부터 해리가 일어난 것으로 보인다.

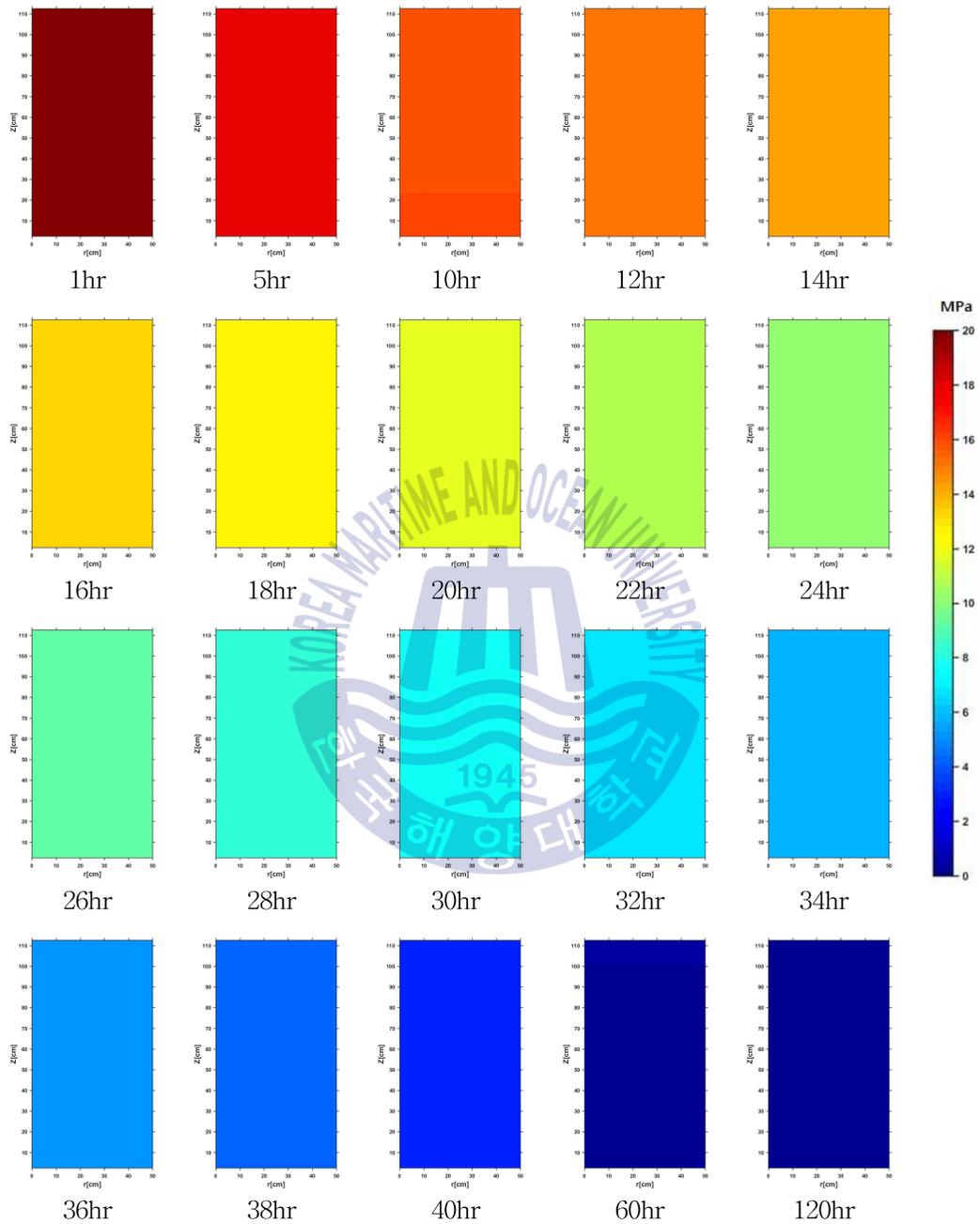


Fig. 18 Spatial distributions of pressure during the depressurization

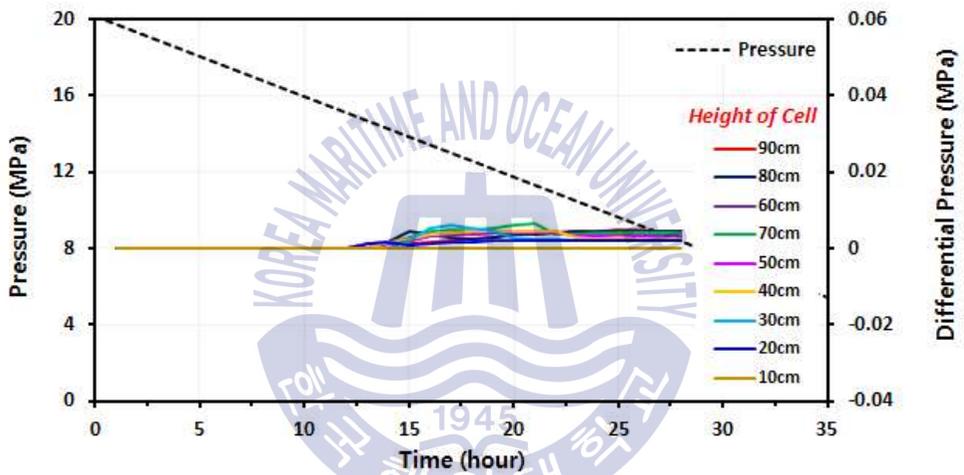


Fig. 19 Simulation result of differential pressure between 5m and 50m

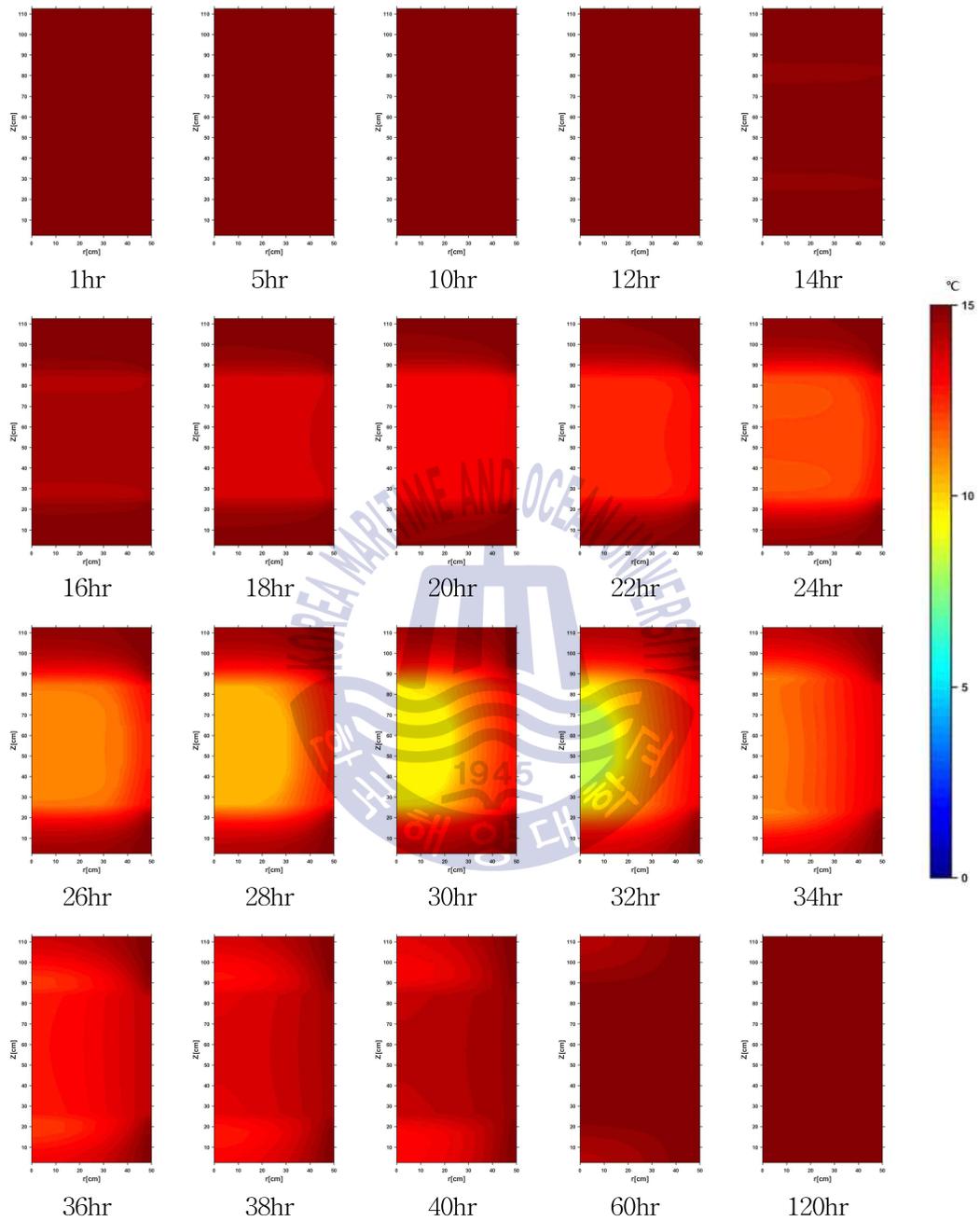


Fig. 20 Spatial distributions of temperature during the depressurization

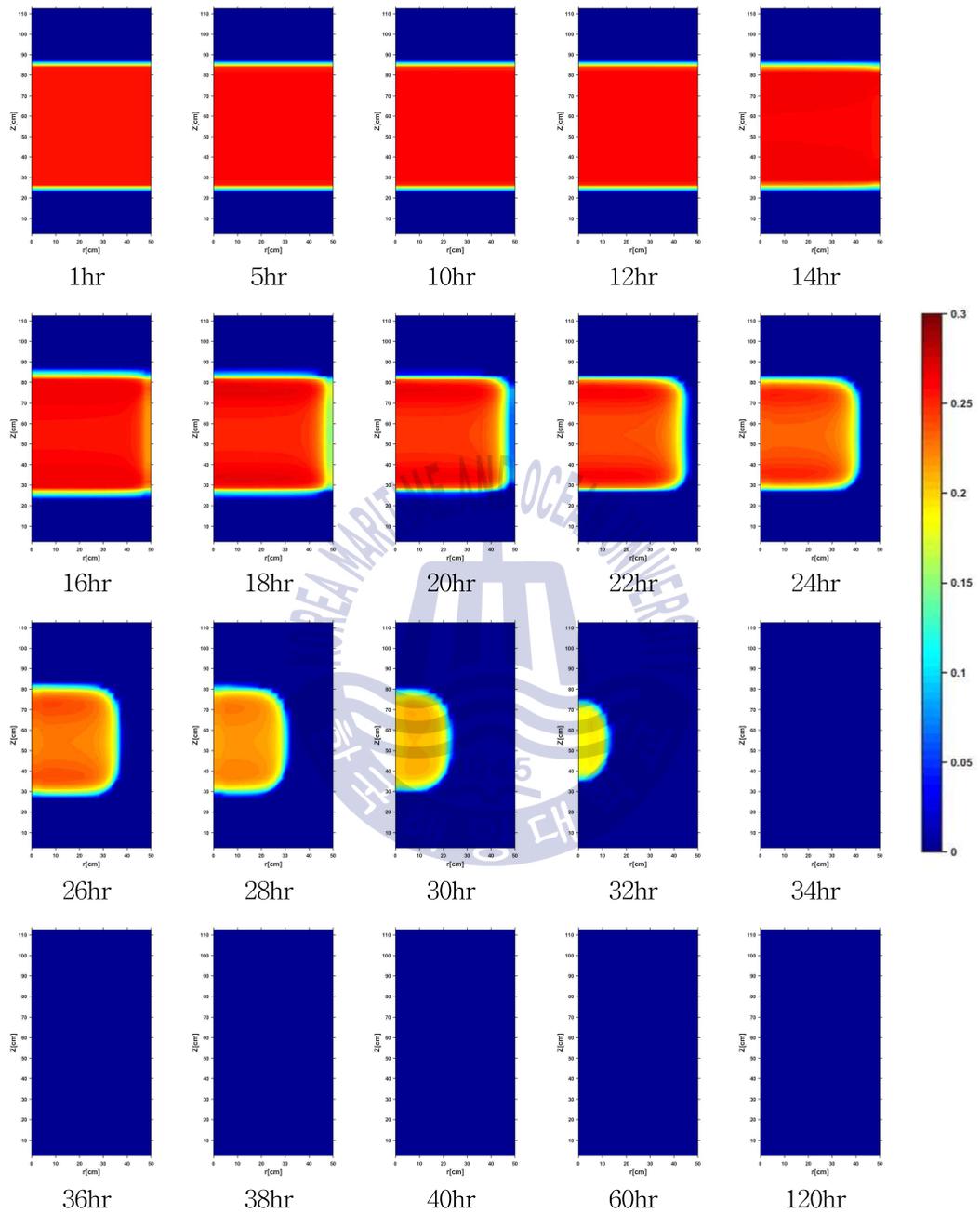


Fig. 21 Spatial distributions of hydrate saturation during the depressurization

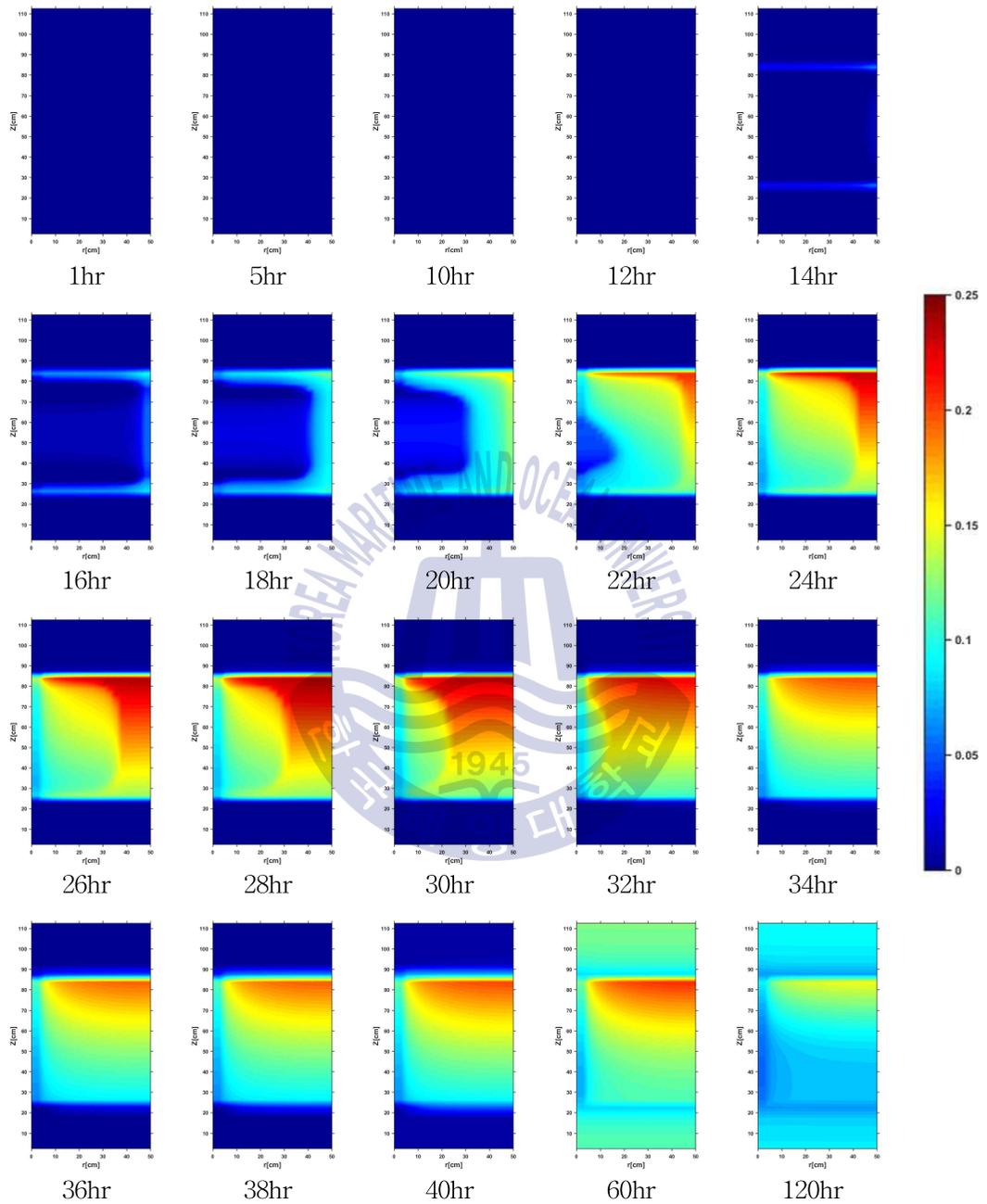


Fig. 22 Spatial distributions of gas saturation during the depressurization

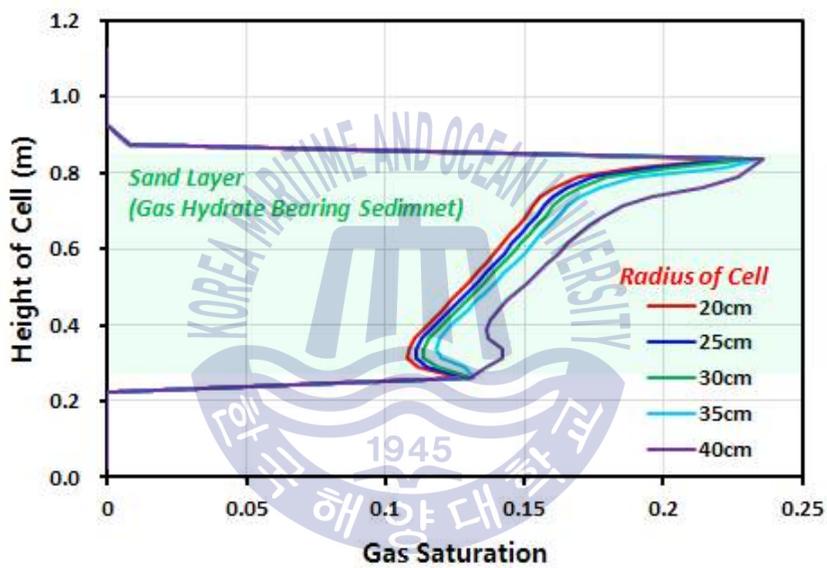


Fig. 23 Gas saturation over height of cell at 25 hours

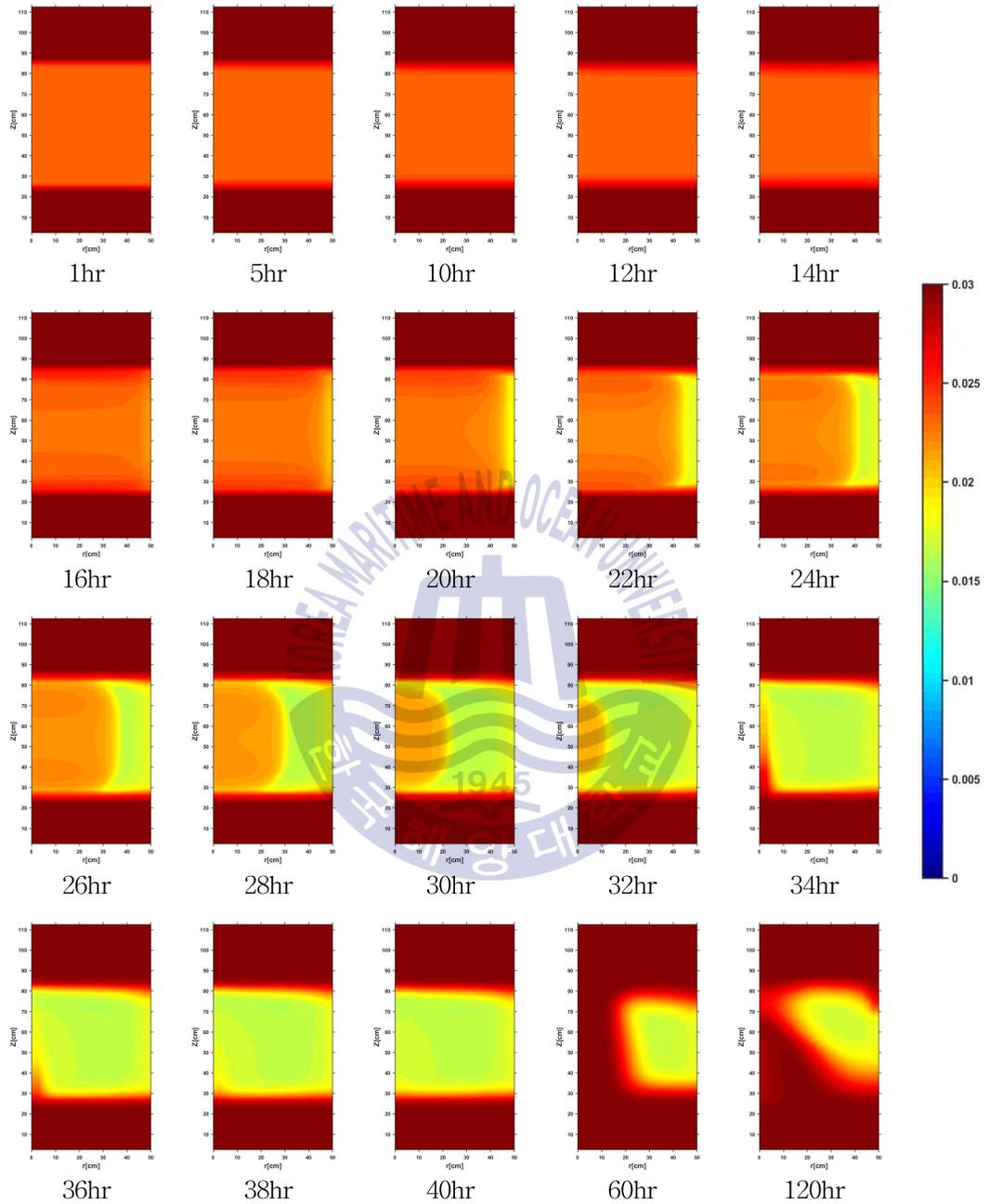


Fig. 24 Spatial distributions of mass fraction of inhibitor during the depressurization

4. 가스하이드레이트 함유 퇴적층 물성에 따른 민감도 분석

가스하이드레이트 개발·생산 계획 수립을 위해 다양한 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 물성에 따른 생산성을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템 내 구축한 전산수치 모델을 이용하여 다양한 가스하이드레이트 함유 퇴적층 물성에 따른 민감도 분석을 수행하였다.

하이드레이트포화율은 염도의 변화를 이용하여 산출이 되며, 비저항 센서를 통해 염도를 측정하는 과정에서 발생하는 오차로 불확실성이 존재하여 하이드레이트포화율에 따른 가스하이드레이트 해리거동을 파악하였다. 또한 가스하이드레이트 해리는 물질전달과 열전달이 복합적으로 작용하여 나타나는 현상으로 물질전달에 영향을 미치는 절대유체투과도와 열전달에 영향을 미치는 열전도도에 따른 해리거동을 파악하였다. 절대유체투과도는 가스하이드레이트 해리를 모사할 때 불확실성이 큰 퇴적층의 변수 중 하나이며(Delli and Grozic, 2013), 가스하이드레이트 해리로 발생하는 가스 및 물의 유동과 관련있다. 열전도도는 흡열반응의 가스하이드레이트 해리로 발생하는 온도변화에 영향을 미치는 퇴적층 물성이다.

중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템을 반영한 전산수치 모델을 이용하여 민감도 분석을 수행하였다. 동일한 감압조건을 적용하여 총 120시간 동안 감압생산을 모사하였으며, 해리유동에 미치는 영향을 파악하기 위해 하이드레이트 해리로 발생하는 해리가스와 물 생산량을 도출하였다.

4.1 하이드레이트포화율 변화

가스하이드레이트 함유 퇴적층 내 염도의 변화를 통해 하이드레이트포화율을 산출할 경우 불확실성이 존재하므로 하이드레이트포화율에 따른 해리거동을 파악하고자 하였다.

중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템을 모사한 전산수치 모델에서 하이드레이트포화율을 30~80% 조건으로 변화하였으며, 전산수치 모델과 동일한 초기조건, 퇴적층의 물성, 감압조건에서 전산수치 해석을 수행하였다. 그 결과 시간에 따른 가스하이드레이트 해리로 발생하는 해리가스와 물 생산거동은 Fig. 25~26과 같다.

전산수치 모델의 감압조건은 동일하게 적용하여 모든 하이드레이트포화율 조건에서 해리가 진행되는 기간은 비슷하게 나타나지만 해리로 발생하는 가스 생산량은 큰 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 하이드레이트포화율이 높을수록 총 해리가스 생산량이 지속적으로 증가하지만 하이드레이트포화율 80% 이상에서 총 해리가스 생산량이 급격히 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 하이드레이트포화율 70~75% 조건에서 추가적으로 전산수치 해석을 수행한 결과 하이드레이트포화율 73%에서 29,194L로 해리가스가 최대로 생산되었으며(Fig. 27), 그 이상에서는 가스 생산량이 급격히 감소하는 것을 확인 하였다. 이는 높은 하이드레이트포화율 조건에서 감압을 위한 물의 생산이 원활이 이루어지지 않아 가스하이드레이트 해리에 영향을 미치는 것으로 파악되며, 감압법을 적용하여 가스하이드레이트를 생산할 경우 일정 하이드레이트포화율 이상에서는 그 효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 물 생산량은 하이드레이트포화율이 높을수록 감소하는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 가스하이드레이트 부피와 물의 부피에 차이가 있기 때문으로 사료된다. 또한 하이드레이트포화율이 높을수록 가스 생산량이 증가하여 물의 유동에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

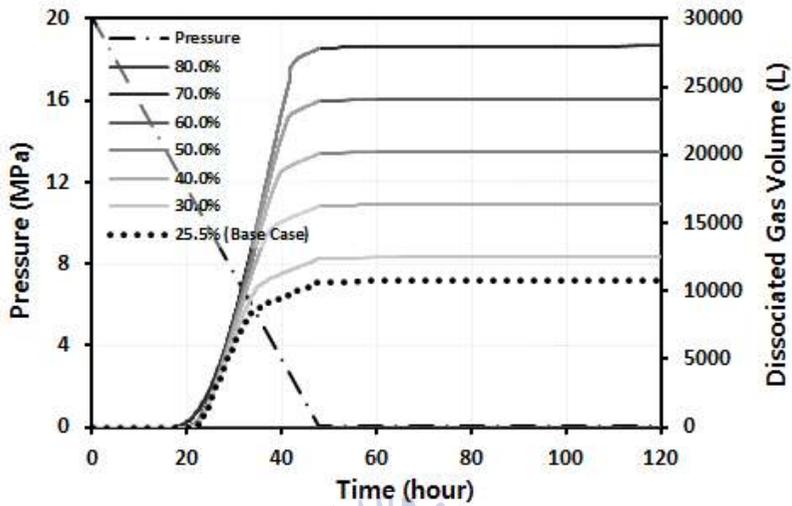


Fig. 25 Simulation result of dissociated gas production depending on the hydrate saturation

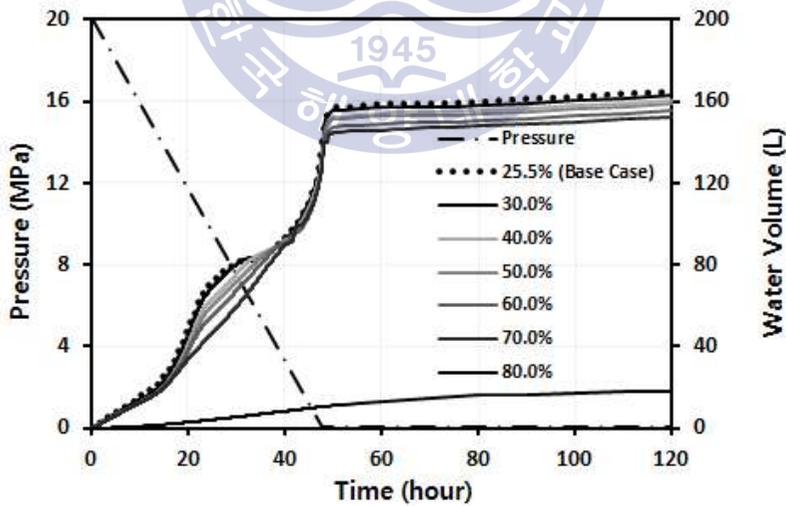


Fig. 26 Simulation result of water production depending on the hydrate saturation

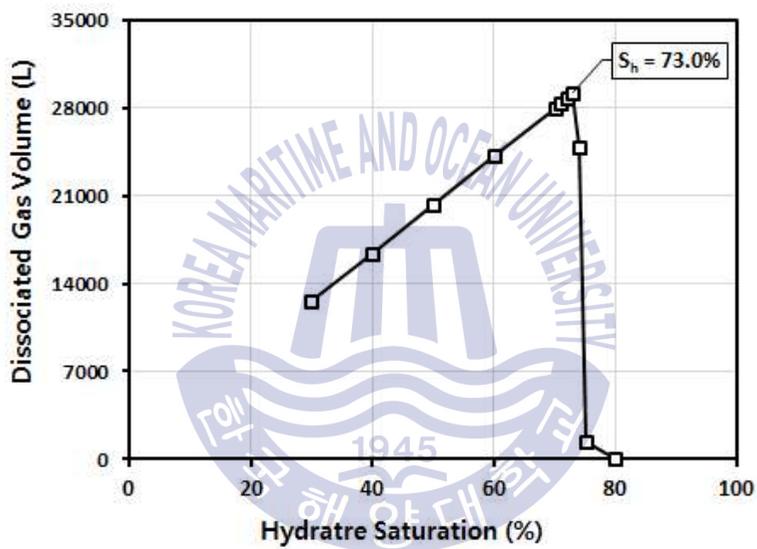


Fig. 27 Dissociated gas volume depending on the hydrate saturation

4.2 절대유체투과도 변화

가스하이드레이트 함유 퇴적층의 절대유체투과도는 해리로 발생하는 가스와 물의 유동에 직접적인 영향을 미치는 요소이며, 감압법을 적용할 경우 절대유체투과도에 따라 감압효율에 차이가 있어 가스 생산량에 영향을 미친다. 또한 가스하이드레이트 해리로 발생하는 공극의 변화로 해리가 진행되는 동안 절대유체투과도의 변화가 있을 가능성이 있어 퇴적층의 다양한 절대유체투과도 조건에서 전산수치 해석을 수행하여 해리거동을 파악하고자 하였다.

동해 울릉분지의 절대유체투과도 값을 고려하여 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템을 모사한 전산수치 모델 중 사질층의 절대유체투과도를 180~15,000md 조건으로 변화였으며, 동일한 초기조건, 퇴적층의 물성, 감압조건에서 전산수치 해석을 수행하였다. 그 결과 시간에 따른 가스하이드레이트 해리로 발생하는 해리가스 및 물 생산거동은 Fig. 28~29와 같다.

전산수치 모델 내 가스하이드레이트의 부존량은 변함이 없어 절대유체투과도가 증가할수록 해리로 발생하는 총 가스 생산량에 큰 차이는 없지만 가스하이드레이트 해리가 진행되는 동안 가스 생산속도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 절대유체투과도가 10,000md 이상조건에서는 가스 생산속도에 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있으며, 이는 절대유체투과도가 전산모델 내부와 외부의 압력 차이에 영향을 받아 일정 수준 이상에서는 그 차이가 미미한 것으로 판단된다. 또한 물의 생산거동은 생산기간에 따라 차이가 있는 것을 볼 수 있으며, 가스하이드레이트의 해리가 진행되는 20~50시간에는 가스의 유동성이 물보다 좋기 때문에 절대유체투과도가 높음에도 불구하고 물 생산량이 감소한 것으로 사료된다. 반면, 대기압으로 감압이 이루어진 50시간부터 가스와 물의 생산이 이루어지지 않아 절대유체투과도에 따른 물 생산량의 차이가 작은 것을 확인할 수 있다.

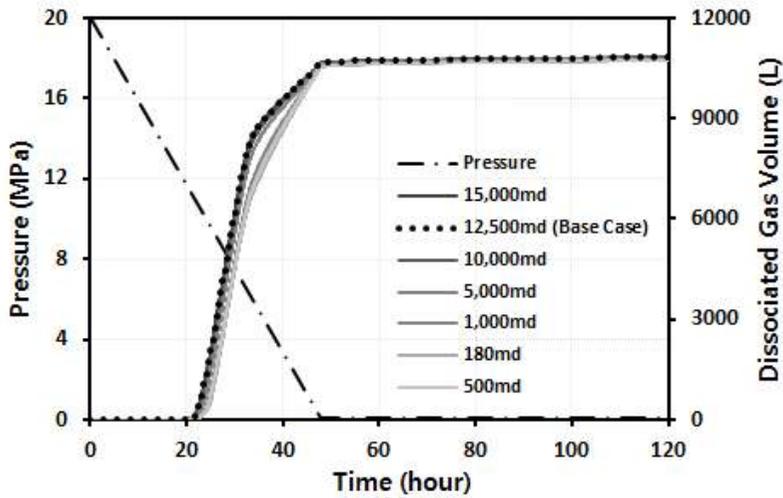


Fig. 28 Simulation result of dissociated gas production depending on the absolute permeability of sand layer

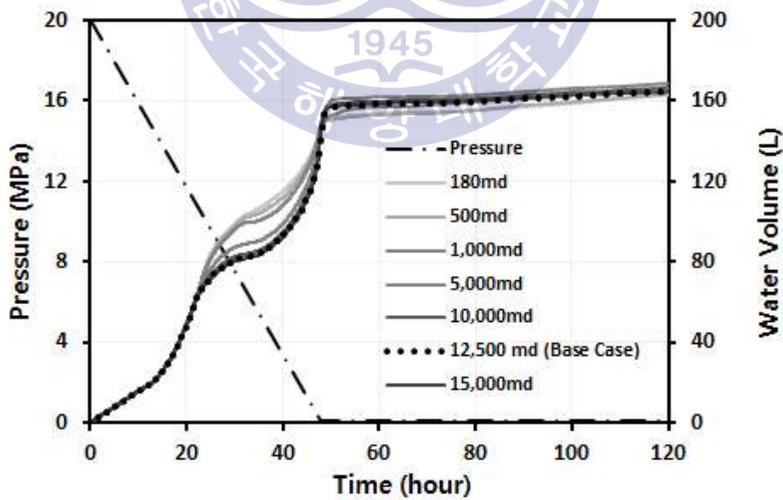


Fig. 29 Simulation result of water production depending on the absolute permeability of sand layer

4.3 열전도도 변화

가스하이드레이트 해리가 진행되는 동안 가스 및 물 포화율의 변화로 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 열전도도에 영향을 미친다. 또한 흡열반응의 가스하이드레이트 해리로 발생하는 온도변화와 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템에서 고압셀의 온도를 유지하기 위한 순환시스템에 대한 영향은 열전도도에 따라 차이가 있어 퇴적층의 다양한 열전도도 조건에서 전산수치 해석을 수행하여 해리거동을 파악하고자 하였다.

동해 울릉분지의 열전도도 값을 고려하여 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템을 모사한 전산수치 모델 중 사질층의 열전도도를 1.45~30W/mK 조건으로 변화였으며, 전산수치 모델과 동일한 초기조건, 퇴적층의 물성, 감압 조건에서 전산수치 해석을 수행하였다. 그 결과 시간에 따른 가스하이드레이트 해리로 발생하는 해리가스 및 물 생산거동은 Fig. 30~31과 같다.

열전도도에 따른 민감도 분석결과는 절대유체투과도의 결과와 유사하게 가스하이드레이트 해리로 발생된 가스의 생산속도에 영향을 미치지만 총 해리가스 생산량에는 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 열전도도가 20W/mK 이상에서는 가스 생산속도에 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있으며, 일정 열전도도 이상조건에서는 바깥경계 부분의 순환시스템에 대한 영향이 동일하게 나타나기 때문에 파악된다. 또한 물 생산량은 열전도도의 변화가 물의 생산거동에 영향을 미치지 않는 것을 파악할 수 있다. 이는 열전도도는 물의 유동과 관련이 없으며, 가스하이드레이트 해리에만 영향을 미치는 것으로 파악이 된다.

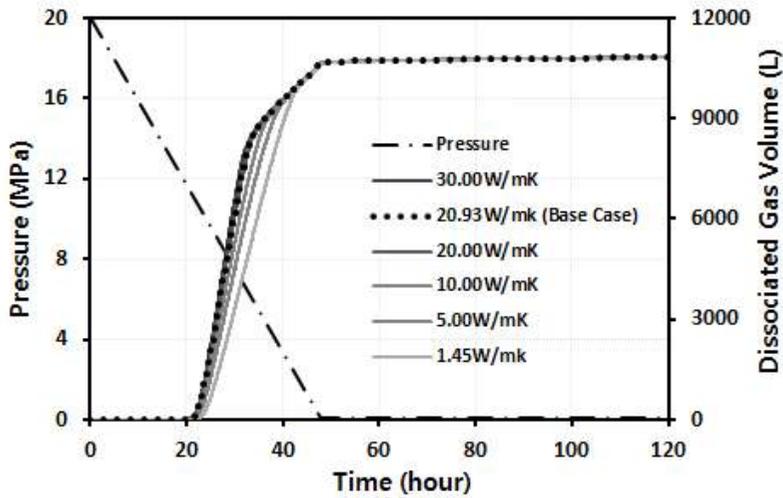


Fig. 30 Simulation result of dissociated gas production depending on the thermal conductivity of sand layer

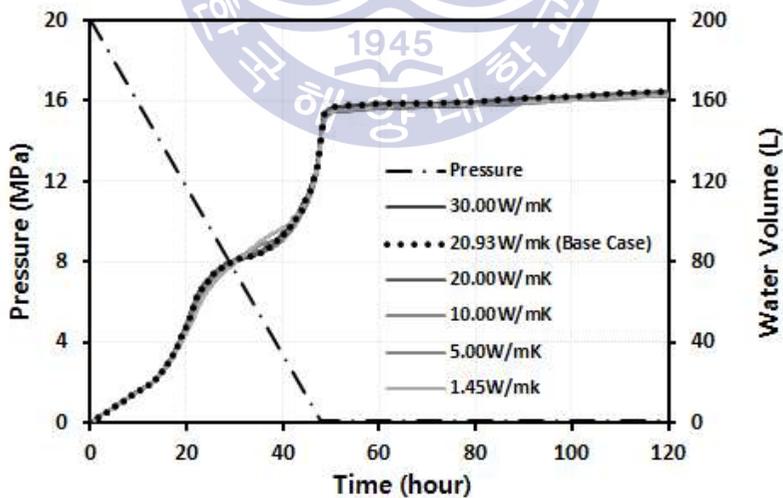


Fig. 31 Simulation result of water production depending on the thermal conductivity of sand layer

5. 결 론

이 연구에서는 현장 적용성을 확장하기 위해 한국지질자원연구원에서 수행한 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험을 바탕으로 전산수치 모델을 구축하였으며, 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 상대유체투과도를 조절하여 실험결과와 전산수치 해석결과를 비교·검증하였다. 그 결과 1차 감압기간 동안 유사한 가스 생산거동을 나타내는 것을 확인하였으며, 전산수치 해석결과 가스 생산량은 7.18%의 오차를 나타내었다. 또한 전산수치 해석결과를 통해 압력, 온도, 하이드레이트포화율, 가스포화율, 염소질량분율을 도출함으로써 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템 내 해리거동의 파악이 가능하였다.

또한 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템 내 퇴적층의 물성에 따른 해리거동을 파악하기 위하여 불확실성이 큰 물성 중 하이드레이트포화율, 절대유체투과도, 열전도도의 변화에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 하이드레이트포화율이 높을수록 총 가스 생산량이 증가하지만 73% 이상의 조건에서는 가스 생산량이 급격히 감소하는 것이 보이며, 이를 통해 일정 하이드레이트포화율 조건 이상에서는 감압법 적용이 어려운 것을 확인하였다. 절대유체투과도와 열전도도는 가스의 생산속도에만 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 두 값이 증가할수록 가스의 생산속도가 증가하였다. 반면 물의 생산거동은 유체의 유동과 관련이 있는 절대유체투과도에 의한 영향만 나타났으며, 해리가 진행되는 동안 절대유체투과도가 높을수록 물 생산량이 감소하는 것을 확인하였다.

이 연구에서 구축한 전산수치 모델을 이용하여 다양한 가스하이드레이트 생산모사 실험에 대한 결과를 예측할 수 있으며, 향후 추가적인 퇴적층 물성에 따른 가스하이드레이트 해리거동을 파악함으로써 효율적인 가스하이드레이트 개발·생산 계획을 위한 기초자료로 이용 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김아람, 이종원, 김형목, 2015. 일본 난카이 해구 가스하이드레이트 퇴적층으로부터의 가스 시험생산 사례분석. *터널과 지하공간*, 24(2), pp.133-143.
- 김지수, 이록상, 임종세, 김세준, 2014. 동해 울릉분지 가스하이드레이트 퇴적층의 해리 유동 전산 분석 연구. *에너지공학*, 23(3), pp.102-115.
- 한국지질자원연구원(KIGAM), 2008. *가스하이드레이트 심부시추시료 분석 및 안정성·지질재해 연구*. 대전:한국지질자원연구원
- 한국지질자원연구원(KIGAM), 2014. *2014년 시험생산시추 대비 산출능력 모사 연구 용역*. 대전:한국지질자원연구원
- 허대기, 2005. 가스하이드레이트 기술개발 현황. *한국지구시스템공학회지*, 42(3), pp.206-213.
- Boswell, R., 2011. Gas Hydrates: Research Status and Potential As Future Energy Supply for the United Sates, *Working document of the North American Resource Development Study*, pp.1-11.
- Boswell, R. and Collett, T.S., 2011. Current Perspectives on Gas Hydrate Resources. *Energy and environmental science*, 4(4), pp.1206-1215.
- Collett, T.S., 2002. Energy resource potential of natural gas hydrates, *AAPG Bulletin*, 86(11), pp.1971-1992.
- Chung, T.H., Ajlan M. and Lee L.L., 1988. Generalized multiparameter correlation for nonpolar and polar fluid transport properties. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 27(4), pp. 671-679.
- Delli, M.L. and Grozic, J.L.J., 2013. Prediction Performance of Permeability

- Models in Gas-Hydrate-Bearing Sands. *SPE Journal*, 18(2), pp. 275-284.
- Demirbas, A., 2010. *Methane Gas Hydrate (Green Energy and Technology)*. Springer: New York
- Fuller, E.N., Ensley, K., and Giddings, J.C., 1969. Diffusion of halogenated hydrocarbons in helium. The effect of structure on collision cross sections. *The Journal of physical chemistry*, 73(11), pp. 3679-3685.
- Haligva, C., Linga, P., Ripmeester, J.A. and Englezos, P., 2010, Recovery of Methane from a Variable-Volume Bed of Silica Sand/Hydrate by Depressurization. *Energy Fuels*, 24(5), pp.2947-2955.
- Kvenvolden, K.A., 1998. A primer on the geological occurrence of gas hydrate. *Geological Society*, 137, pp.9-30.
- Kurihara, M., Ouchi, H., Narita, H. and Masuda, Y., 2011. Gas Production from Methane Hydrate Reservoirs. *the 7th International Conference on Gas Hydrate*, Edinburgh, United Kingdom, July 17-21.
- Lee, S.R., Kim, D.S., Ryu, B.J., Bahk, J.J., Yoo, D.G., Kim, G.Y., Lee, J.Y., Yi, J.S., Collett, T.S., Riedel, M. and Torres, M.E., 2011. Recent Development of Gas Hydrate Program in Korea: Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition 2. *the 7th International Conference on Gas Hydrate*, Edinburgh, United Kingdom, July 17-21.
- Li, X.S. and Zhang, Y, 2011. Study on Dissociation Behaviors of Methane Hydrate in Porous Media Based on Experiments and Fractional Dimension Shrinking-Core Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(13), pp.8263-8271.
- Liu B., Yuan, Q., Su, K.H., Yang, X., Wu, B.C., Sun, C.Y. and Chen, G.J., 2012. Experimental Simulation of the Exploitation of Natural Gas Hydrate, *Energies*, 5(2), pp.466-493.
- Lu, S.M., 2015. A global survey of gas hydrate development and reserves:

- Specifically in the marin field, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp.884-900.
- Maribus, 2014. *World Ocean Review (WOR), Chapter3: Marine Resources - Opportunities and Risks*, Hamburg: Maribus.
- Moridis, G.J. and Regan, M.T., 2007. Strategies for Gas Production From Oceanic Class 3 Hydrate Accumulations. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, April 3-May 3.
- Moridis, G.J., Kim, J.H., Reagan, M.T. and Kim, S.J., 2014. System Respense 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 Korea East Sea. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, May 5-8.
- Morrell, R., 1987. *Handbook of Properties of Technical and Engineering Ceramics: Part 2. Data Reviews: Section 1 High-alumina Ceramics*. Stationery Office Books: London
- Mualem, Y., 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*, 12(3), pp. 513-522.
- Nagao J., 2012. Development of methane hydrate production method - A large-scale laboratory reactor for methane hydrate production test. *Synthesiology*, 5(2), pp. 89-97.
- Peng, D.Y. and Robinson, D.B., 1976. A New Two-Constant Equation of State. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 15(1), pp. 59-64.
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G.J., 1999. *TOUGH2 User's Guide - Version 2.0.*, California: Lawrence Berkely Laboratory Report.
- Riazi, M.R. and Whitson, C.H., 1993. Estimating diffusion coefficients of dense fluids. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 32(12), pp. 3081-3088.
- Spangenberg, E. and Kulenkampff, J., 2006. Influence of Methane Hydrate

Content on Electrical Sediment Properties. *Geophysical Research Letters*, 33(24), L24315

Stone, H.L, 1970. Probability Model for Estimating Three-Phase Relative Permeability. *Journal of Petroleum Technology*, 22(2), pp.214-218.

Touloukian, Y.S and Buyco, E.H., 1970. *Specific Heat - Nonmetallic Solids*, *Thermophysical properties of Matter*. Vol. 5. Springer: New York

US Department of Energy(US DOE), 2006. *An interagency five year plan for methane hydrate research and development*. Washington: DOE.

US Department of Energy(US DOE), 2007. *An interagency road map for methane hydrate research and development*. Washington: DOE.

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), pp. 892-898.

Yamamoto, K., Terao, Y., Fujii, T., Ikawa, T., Seki, M., Matsuzawa, M and Kanno, T., 2014. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough. *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, May 5-8.