



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

감압법 적용에 따른 가스하이드레이트
함유 퇴적층 내 해리 유동 전산분석 연구

Numerical Analysis on Dissociation Behavior of
Gas Hydrate bearing Sediments by Depressurization



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

길 성 민

본 논문을 길성민의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 장 원 일 (인)

위 원 임 중 세 (인)

위 원 정 우 근 (인)



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 가스하이드레이트포화율에 따른 미니 고압 Cell 실험	4
2.1 실험방법	4
2.2 감압 생산 및 실험결과	7
제 3 장 미니 고압 Cell 실험 전산수치해석	9
3.1 TOUGH+HYDRATE 개요	9
3.2 미니 고압 Cell 실험 전산수치 모델 구성	11
3.3 전산수치해석 결과 비교 분석	16
3.4 다양한 가스하이드레이트포화율 조건에 따른 전산수치해석	24
제 4 장 중규모 생산모사 실험 전산수치해석	32
4.1 전산수치 모델 입력변수 설정	32
4.2 한계 가스하이드레이트포화율 조건의 전산수치해석 결과	35

제 5 장 결 론 43

참고문헌 45



List of Tables

Table 1 Properties of experimental cells	6
Table 2 Input parameters of TOUGH+HYDRATE simulator considering experimental system	12
Table 3 Input parameters of TOUGH+HYDRATE simulator	34
Table 4 Total gas and water production at 150hr	35



List of Figures

Fig. 1 Gas hydrate distribution map	3
Fig. 2 Gas hydrate experimental production system by X-ray CT scanner	4
Fig. 3 CT value distribution according to the experimental phase	6
Fig. 4 CT normalized results depending on gas hydrate saturation	8
Fig. 5 Plane diagram of numerical simulation model considering mini pressure cell ...	11
Fig. 6 Change of absolute permeability depending on gas hydrate saturation	13
Fig. 7 Relative permeability of gas and water for history matching	15
Fig. 8 Correlation of gas hydrate saturation and fluid density	17
Fig. 9 Comparison of experiment and simulation result	19
Fig. 10 CT value, fluid density and gas hydrate saturation distribution of H1($S_h=0.17$)	20
Fig. 11 CT value, fluid density and gas hydrate saturation distribution of H2($S_h=0.51$)	21
Fig. 12 Spatial distribution of H1($S_h=0.17$)	22
Fig. 13 Spatial distribution of H2($S_h=0.51$)	23
Fig. 14 Cumulative production depending on gas hydrate saturation	25
Fig. 15 Dissociation gas flow rate depending on gas hydrate saturation	26
Fig. 16 Spatial distribution of 50% gas hydrate saturation	27
Fig. 17 Spatial distribution of 60% gas hydrate saturation	28
Fig. 18 Pressure changes of mini pressure cell according to gas hydrate saturation ..	30
Fig. 19 Temperature changes of mini pressure cell according to gas hydrate saturation ...	31
Fig. 20 Schematic diagram of numerical simulation model reflecting the gas hydrate experimental production system	33

Fig. 21 Gas and water production of gas hydrate experimental production system	36
Fig. 22 Spatial distribution of pressure at gas hydrate experimental production system	38
Fig. 23 Spatial distribution of temperature at gas hydrate experimental production system	39
Fig. 24 Spatial distribution of gas hydrate saturation at gas hydrate experimental production system	40
Fig. 25 Spatial distribution of gas saturation at gas hydrate experimental production system	41
Fig. 26 Temperature changes at different points of gas hydrate experimental production system	42



감압법 적용에 따른 가스하이드레이트 함유 퇴적층 내 해리 유동 전산분석 연구

길 성 민

한국해양대학교 대학원
해양에너지자원공학과

초 록

가스하이드레이트는 천연가스가 저온·고압 상태에서 물과 결합하여 생기는 고체 형태의 물질로 국내의 경우 동해 울릉분지에 약 6~8억 톤 이상이 부존되어 있을 것으로 추정하고 있으며, 현장시험생산을 수행하기 위해 심해 퇴적층에서의 유동 특성 및 생산기법 적용에 따른 효율 분석 연구가 수행되고 있다. 선행 연구를 통해 특정 가스하이드레이트포화율 조건에서 감압법 적용 시 가스생산이 지연되는 한계 포화율의 존재 가능성이 발견됨에 따라 현장시험생산 후보지 퇴적층 조건에서 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하는 것이 요구된다. 이를 위해 한국지질자원연구원에서는 다양한 가스하이드레이트포화율 조건에서 코어 스케일의 생산모사 실험을 수행하였다.

이 연구에서는 코어 스케일의 생산모사 실험에 대한 전산수치해석을 통해 실험결과에 대한 검증 및 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하고자 하며, 예측된 한계 가스하이드레이트포화율에 대한 현장 적용성 확장을 위해 중규모 실험 시스템을 반영한 전산수치해석을 수행하고자 한다. 실험에서 측정된 자료들과 퇴적시료의 물성을 활용하여 실험시스템을 모사한 전산수치 모델을 구축하였으

며, 감압법 적용에 따른 실험에서 측정된 CT값과 전산수치해석을 통해 파악된 가스하이드레이트를 포함한 유체밀도 변화를 비교·분석한 결과 가스하이드레이트 해리 양상이 유사한 것을 파악할 수 있었다. 이렇게 구축된 전산수치 모델을 활용하여 실험조건이 포함된 다양한 가스하이드레이트포화율 조건(10~80%)에서의 해리 거동 분석으로 확장 적용하였다. 그 결과 50~60% 포화율 조건에서 가스 및 물 생산량이 지연되는 것을 파악할 수 있었으며, 이를 통해 해당 조건에서 한계 가스하이드레이트포화율이 존재할 것으로 사료되었다. 중규모 실험시스템을 모사한 전산수치 모델을 활용하여 포화율 50%와 60%에서 생산 변화를 파악한 결과 미니 고압 Cell 연구를 통해 파악한 한계 가스하이드레이트포화율과 유사하게 포화율 60%에서 생산이 지연되는 것을 확인할 수 있었다.

KEY WORDS: 가스하이드레이트; 한계 가스하이드레이트포화율; 전산수치해석; 감압법.



Numerical Analysis on Dissociation Behavior of Gas Hydrate bearing Sediments by Depressurization

Seong Min Gil

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

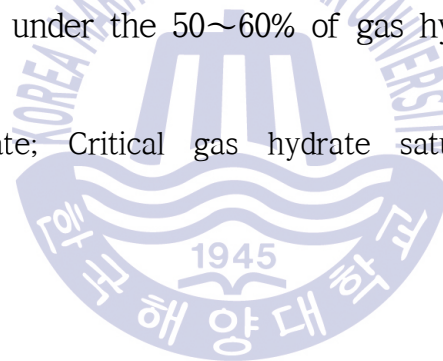
Abstract

Gas hydrate is solid clathrate compound in which a large amount of methane is trapped within a crystal structure of water. There are estimated 6~8 billion tons of gas hydrate bearing in Ulleung Basin of the Korean East Sea. Prior to the field production test, the production analysis is conducted by using the flow characteristics and the application of production techniques at the deep sea sediment. Throughout studies, it was found that the gas productivity was delayed due to the depressurization in high gas hydrate saturation. Therefore, it is significantly important to know about the critical gas hydrate saturation at the field production test site. For this reason, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM) conducted the experiment with mini pressure cells from various gas hydrate saturation.

In this study, the numerical simulation model, which reflected the mini pressure cell, was built to verify the experimental results and to figure out the critical gas hydrate saturation. To extend the field applicability for the critical

gas hydrate saturation, the numerical analysis was conducted by the gas hydrate experimental production system. The numerical simulation model was built with the consideration of mini pressure cell. The experimental results and the numerical simulation results were compared and analyzed by normalizing the fluid densities and CT values. As a result, the changes in the fluid density and CT values due to the depressurization showed similar trend. The numerical simulation model was utilized in order to determine the dissociation behavior and productivity at various gas hydrate saturation(10~80%). Gas and water production were delayed between 50~60% of gas hydrate saturation. According to the numerical analysis which considered the gas hydrate experimental production system, it showed the similar production trend with the mini pressure cell results. As the results, it suggested that the critical gas hydrate saturation existed under the 50~60% of gas hydrate saturation.

KEY WORDS: Gas hydrate; Critical gas hydrate saturation; Numerical analysis; Depressurization method.



제 1 장 서 론

가스하이드레이트(gas hydrate)는 천연가스가 저온·고압 상태에서 물과 결합하여 생기는 고체 형태의 결정으로 영구동토층(permafrost) 및 심해 퇴적층(deep ocean sediments)에 부존되어 있다. 가스하이드레이트의 주 구성 성분인 메탄(CH_4)은 연소 시 타 화석연료에 비해 이산화탄소(CO_2)를 상대적으로 적게 배출하는 친환경적인 특성을 가지고 있어 청정 에너지원으로 각광받고 있다. 또한 대기압 상태에서 존재하는 메탄가스보다 약 180배 압축된 가스가 가스하이드레이트 격자 내에 포집되어 존재하며, 비전통자원인 셰일가스와 마찬가지로 에너지자원 공급의 다변화에 기여할 수 있는 미래 에너지원으로 전망되고 있다.

전 세계적으로 Fig. 1과 같이 해저에 부존되어 있는 가스하이드레이트의 실물 채취 및 부존지역의 지질학적 특징을 파악하기 위한 시추작업을 수행하고 있으며, 90% 이상의 가스하이드레이트가 해저에 부존되어 있는 것으로 사료된다(김아람 등, 2015). 국내의 경우 동해 울릉분지에 약 6~8억 톤 이상의 가스하이드레이트가 부존되어 있을 것으로 추정하고 있으며(허대기, 2005), 2007년 울릉분지 1차 시추(UBGH1)에서 국내 최초로 가스하이드레이트 실물 채취에 성공하였다(허대기와 이주용, 2017). 2010년에는 가스하이드레이트 부존량 평가와 현장 시험생산 후보지 선정에 대한 목적으로 총 13개의 2차 시추(UBGH2)를 수행하였으며(Lee et al., 2011), 해당지역 시추공 자료를 바탕으로 서광원 등(2010)과 신호진 등(2012)은 가스하이드레이트가 함유된 사질층에 대한 주요 물성을 추정하였다. 또한, 1, 2차 시추 지역 중 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 퇴적상, 공극률, 가스하이드레이트포화율 파악이 완료된 11개 시추공을 선정하여 3차원 공간 물성 분포를 추정한 바 있다(이동건 등, 2013; Shin et al., 2014).

Moridis et al.(2009)은 가스하이드레이트 해리로 인한 생산성 평가를 위해 전산수치해석을 수행하였으며, 한국지질자원연구원(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, KIGAM)에서는 현장 시험생산 후보지가 점토-사질층이

교호된 미고결 퇴적층인 것에 기인한 지반 안정성 문제를 고려하기 위해 지반 역학적인 수치해석을 연계한 연구를 수행하였다(한국지질자원연구원, 2010). 또한 미국 Lawrence Berkeley National Laboratory(LBNL)에서 개발한 TOUGH+HYDRATE 전산수치 시뮬레이션을 활용하여 현장 시험생산 후보지를 모사한 전산수치 모델을 구축하고 주요 생산 조건별 감압 생산 거동에 대한 민감도 분석을 수행하였다(김지수 등, 2014; Kim et al., 2014). 전산수치해석 결과와 실제 생산 자료의 히스토리매칭 작업을 대비하기 위하여 다양한 생산 시나리오와 퇴적층 물성을 가정하여 생산성에 영향을 미치는 인자를 파악하였다(Lee et al., 2015). 한국지질자원연구원(2015)에서 생산기법의 현장 적용성 확장을 위해 감압법을 이용한 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험을 수행하였으며, 실험 결과에 대한 검증에 대해 실험조건을 반영한 전산수치 모델을 구축하여 실험결과와 비교·분석을 수행하였다(이성민 2016; 길성민 등, 2017).

선행 연구들을 통하여 감압법을 적용한 가스하이드레이트 생산 시 특정 가스하이드레이트포화율 이상의 조건에서 생산 효율이 감소하는 현상이 발견되었다(Moridis et al., 2013; 이성민 2016). 이는 퇴적층 내 고체상의 가스하이드레이트가 생성됨에 따라 공극률 및 유체투과도가 감소하게 되어 가스하이드레이트포화율과 유체투과도의 반비례적 관계를 보이며, 그 결과 특정 가스하이드레이트포화율 조건에서 감압법 적용 시 압력전파 지연에 따른 생산 효율이 감소한 것으로 사료된다. 따라서 가스하이드레이트 시험생산 시 생산지연이 발생할 가능성이 있어 효과적인 감압 생산을 수행하기 위해 대상지역의 퇴적층 조건에서 가스 생산이 지연되기 시작하는 한계 가스하이드레이트포화율에 대한 파악이 요구된다. 이를 위해 한국지질자원연구원(2016)에서는 동해 울릉분지 현장조건에서의 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하고자 다양한 가스하이드레이트포화율 조건에서 해리 전파 양상을 가시화하기 위해 CT(Computer Tomography) 촬영을 이용한 코어 스케일의 생산모사 실험을 수행하였다.

이 연구에서는 선행된 코어 스케일의 생산모사 실험을 반영한 전산수치 모델을 구축하여 실험결과에 대한 검증 및 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하고자 하며, 예측된 한계 가스하이드레이트포화율에 대한 현장 적용성 확장을 위해 중규모 실험시스템을 반영한 전산수치해석을 수행하고자 한다.

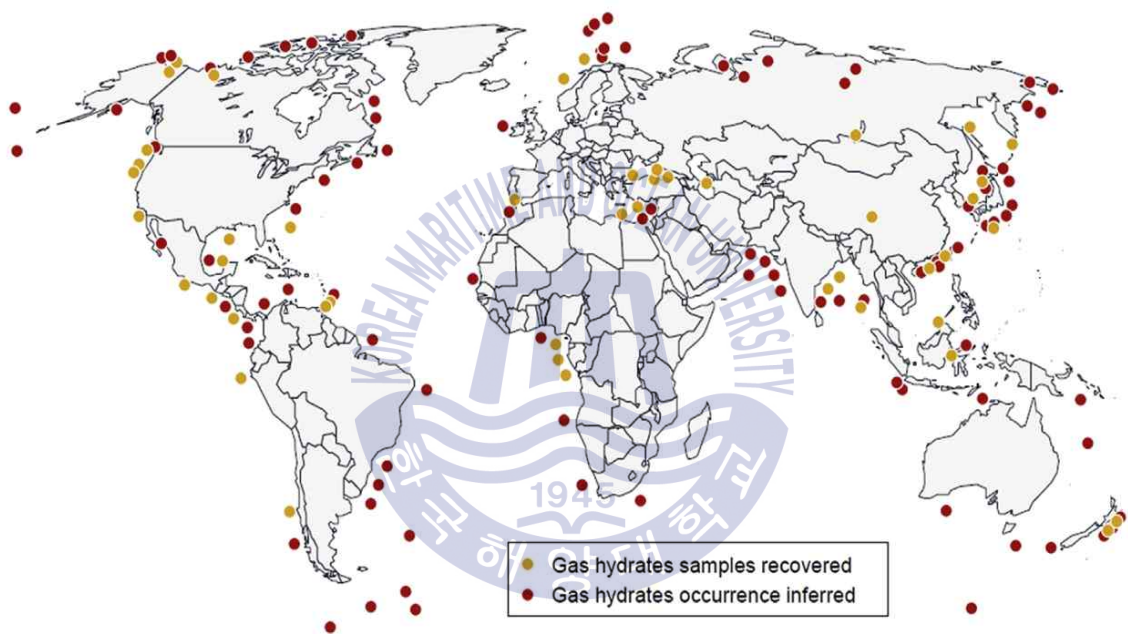


Fig. 1 Gas hydrate distribution map(Merey, 2016)

제 2 장 가스하이드레이트포화율에 따른 미니 고압 Cell 실험

2.1 실험방법

가스하이드레이트 생산모사 실험을 통해 현장 시험생산 후보지 퇴적층의 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하고자 한국지질자원연구원(2016)에서는 다양한 가스하이드레이트포화율 조건의 X-ray CT 전용 미니 고압 Cell을 설계 제작하였으며(Fig. 2), 가스하이드레이트 해리 실험 시 저압 상태에서 가스/물 분리 및 측정 가능한 모듈과 유체주입, 배출 및 측정, 온도 유지 장치 등의 기능을 가진 가스하이드레이트 생산모사시스템을 구축하였다.

미니 고압 Cell 실험은 시료 충전, 누출 시험, 초기 물포화율 설정, 가스하이드레이트 생성, 가스하이드레이트포화율 계산, 가스하이드레이트 생성 후 물 포화의 6단계로 진행되었다.



Fig. 2 Gas hydrate experimental production system by X-ray CT scanner(한국지질자원연구원, 2016)

감압법을 이용하여 가스하이드레이트를 생산할 경우 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 입자크기에 따라 해리 거동이 다르게 나타남으로(Li & Zhang, 2011; Haligva et al., 2010) 현장시험생산 후보지의 퇴적층 입도분포를 고려하고자 모래 재질의 시료를 사용하여 충전 작업을 수행하였다. 충전된 실험 Cell을 시스템에 장착한 후 누출 시험을 수행하였으며, 질소 가스를 일정 압력으로 주입하여 미니 고압 Cell의 모든 구간에서 누출이 없는 것을 확인하였다.

NaCl 3%의 염수를 이용하여 실험시스템 내 퇴적층을 포화시켰으며, 주입된 염수의 양을 통해 공극률을 측정하였다. 염수로 포화된 실험시스템 내 다양한 범위의 초기 물포화율(initial water saturation, S_{wi})을 설정하고자 서로 다른 유속으로 메탄가스를 주입하였다. 이 후 가압을 통해 가스상으로 존재하는 메탄을 이용하여 비교적 빠른 시간 내 가스하이드레이트를 생성하였으며, 주입된 메탄가스의 몰수로부터 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 생성된 가스하이드레이트의 포화율을 계산하였다.

$$S_h = \frac{V_{gi}}{172} \frac{\Delta P}{P_o} \frac{T_o}{T_f} \frac{1}{AL\phi} \quad (1)$$

$$N_{hf} = \frac{V_{gi} [P_i T_{final} - P_{final} T_i]}{T_i [RT_{final} - 0.2(W_h/\rho_h)P_{final}]} \quad (2)$$

- A : Cross section of Area (cc)
- L : Length of sample (cm)
- N_{hf} : Mole of gas hydrate (mol)
- P_{final} : Final state pressure (psi)
- P_i : Initial state pressure (psi)
- P_o : Standard state pressure (psi)
- S_h : Gas hydrate saturation (fraction)
- T_{final} : Final state temperature (K)
- T_f : Gas hydrate generation temperature (K)
- T_i : Initial state temperature (K)
- T_o : Standard state temperature (K)
- R : Gas constant ($cc \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)
- V_{gi} : Gas Volume (cc)
- W_h : Molecular weight of gas hydrate (g/mol)
- ϕ : Porosity (fraction)
- ρ_h : Gas hydrate density (g/cm)

가스하이드레이트 1차 생성 후 포화율을 산출하였으며, 예상보다 낮은 포화율로 인하여 추가적인 가스하이드레이트를 생성하고자 메탄가스를 추가 주입하였다. 가스하이드레이트 2차 생성 후 실험시스템 내 잔류하고 있는 메탄가스를 물로 치환하여 퇴적층 공극 내 물과 가스하이드레이트만 존재하도록 하였으며, 각 실험 Cell 별 물성값을 산출하였다(Table 1). 또한, 주요 실험단계 별 실험 Cell 내 CT값 분포 변화에 대하여 Fig. 3에 나타내었다. 이를 통해 H1($S_h=0.17$), H2($S_h=0.51$) 내 초기 가스하이드레이트가 균질하게 형성된 것을 파악할 수 있었다.

Table 1 Properties of experimental cells(한국지질자원연구원, 2016)

Cell Number	Porosity	Gas hydrate saturation	Initial Temperature
H1	44.7	0.17	16.5
H2	42.7	0.51	16.6

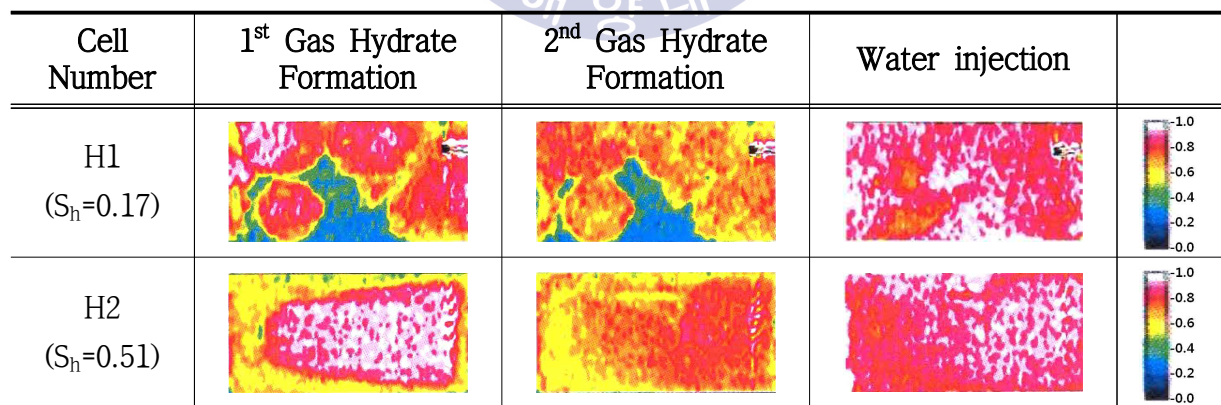


Fig. 3 CT value distribution according to the experimental phase
(한국지질자원연구원, 2016)

2.2 감압 생산 및 실험결과

퇴적 시료에 형성된 가스하이드레이트를 생산하고자 초기 압력 2,900psi(20MPa) 조건에서 0.5MPa/hr로 감압을 진행하였으며, 감압법 적용에 따른 가스하이드레이트 해리 양상을 파악하고자 CT값 변화를 측정하였다. 실험에서 측정된 CT값은 실험시스템 내 밀도변화를 의미하며, 가스하이드레이트가 해리됨에 따라 실험시스템 내 밀도값은 변화하게 된다. 따라서 가스하이드레이트 해리의 영향으로 변화하는 밀도값은 CT값 변화를 통해 파악할 수 있으며, 이를 통해 실험시스템 내 가스하이드레이트 해리 거동을 유추할 수 있다.

한계 가스하이드레이트포화율에 의한 해리 지연 현상으로부터 가스하이드레이트의 절대적인 양에 의해 생산이 지연되는 효과를 제거하고자 각 실험 Cell의 감압 진행 중 CT값을 식 (3)과 같이 초기 값과 감압 후 최종 값으로 정규화하였다(Fig. 4). 두 실험 Cell 모두 가스하이드레이트가 해리됨에 따라 CT값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 초기 가스하이드레이트포화율이 높은 H2($S_h=0.51$)는 H1($S_h=0.17$)과 비교하여 생산압력 대비 CT값 변화가 천천히 감소하는 것을 파악할 수 있었다. H1($S_h=0.17$)의 경우 가스하이드레이트 해리가 약 2,500psi 조건에서 완료되었다. H2($S_h=0.51$)는 감압 과정에서의 큰 문제는 발생하지 않았으나 해리 압력에 해당하는 구간에서 CT 이미지의 오류로 인하여 CT값 변화를 측정하지 못하였으며, 실험 Cell 내 온도 및 압력 변화를 통해 약 2,200psi 조건에서 해리가 완료되는 것을 파악하였다. 이를 통해 감압이 진행됨에 따라 초기 가스하이드레이트포화율이 높은 실험 Cell의 해리가 지연되는 결과를 보였으며, 이는 생산기법의 현장 적용성 확장을 위한 주요 자료로 활용될 수 있다.

$$CT_{normalized}^* = \frac{CT_i - CT_{initial}}{CT_{final} - CT_{initial}} \quad (3)$$

- $CT_{normalized}^*$: Normalized CT value
- CT_i : CT value during depressurization
- $CT_{initial}$: Initial CT value before depressurization
- CT_{final} : Final CT value after depressurization

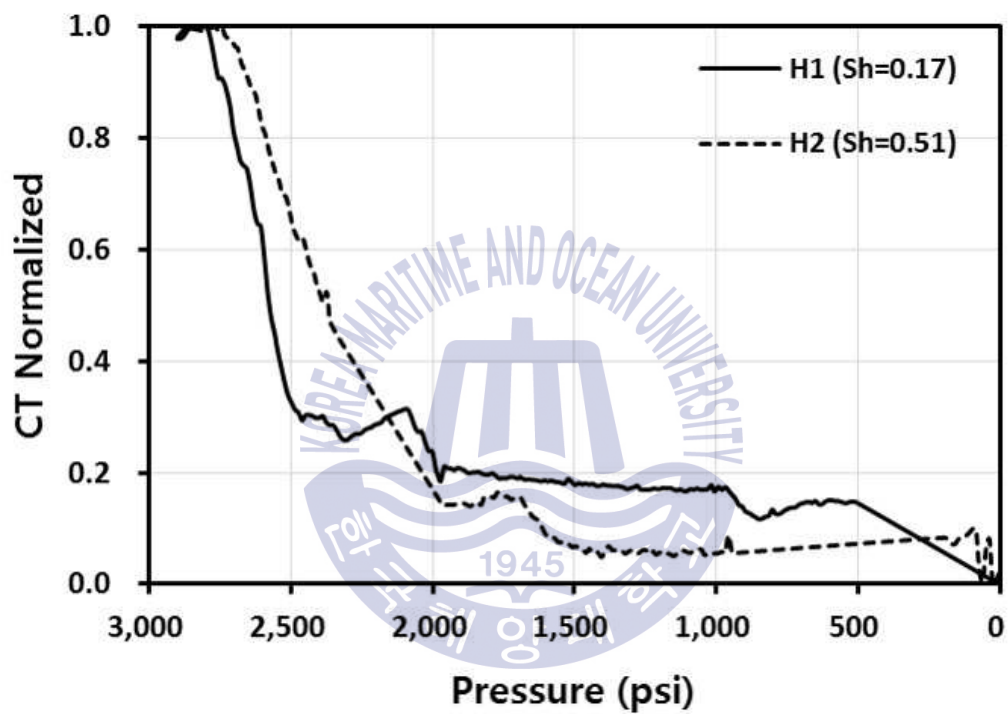


Fig. 4 CT normalized results depending on gas hydrate saturation(한국지질자원연구원, 2016)

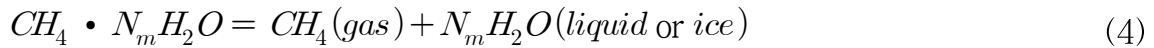
제 3 장 미니 고압 Cell 실험 전산수치해석

3.1 TOUGH+HYDRATE 개요

이 연구에서는 실험시스템을 모사한 전산수치 모델을 구축하고자 미국 LBNL에서 개발한 TOUGH+HYDRATE 전산수치 시뮬레이션 프로그램을 사용하였으며, 이는 다공성 매질 및 균열체 내에서의 다상·다성분 유체 유동 모사 및 전산 해석이 가능한 TOUGH 전산수치 시뮬레이션 코드를 가스하이드레이트 함유 퇴적층에서의 메탄가스 생산 거동 모사가 가능하도록 수정 및 보완한 모듈이다. TOUGH+HYDRATE는 유한한 체적에서 4종류의 조성(H_2O , CH_4 , CH_4 -hydrate, water-soluble inhibitors : salt 또는 alcohols)에 대한 적용이 가능하며, 이들 각각은 gas, aqueous liquid, ice, hydrate 4종류의 상에 대한 시뮬레이션을 구현할 수 있는 전산수치 모델로 열역학적 해석이 가능하여 가스하이드레이트 함유 퇴적층에서의 다상 유동(multiphase flow)을 모사할 수 있다. 추가적으로 온도 변화에 따른 가스하이드레이트 해리 거동 시뮬레이션이 가능하며, Darcy 법칙, 물질평형방정식(mass balance equation), 열평형 방정식(heat balance equation) 등을 기반으로 가스하이드레이트 함유 퇴적층에서의 가스 생산 거동에 대한 시뮬레이션이 가능하다. 또한, 영구동토층 및 심해 퇴적층에서 온도 변화에 따른 가스 해리(non-isothermal gas release), 수화 반응(hydration reaction), 상 거동(phase behavior), 유체 유동(flow of fluids), 수력학적(hydraulic) 거동, 열적(thermal) 거동, 열역학적(thermodynamic) 거동을 모델링할 수 있으며, 가스하이드레이트 해리와 형성을 유발하는 압력, 온도, 억제제의 변화에 따라 지층 내에서 열역학적 특징(압력, 온도, 유체포화율, 염수 농도 등)의 예측이 가능하다. 가스하이드레이트 형성과 해리에 대한 모델링은 평형 모델(equilibrium model)과 동적 모델(kinetic model)로 구현할 수 있으며, 4가지 상의 결합을 통해 총 15개

의 상으로 나타내어 가스하이드레이트 해리 메커니즘의 결합과 상변화 시 일어나는 급격한 열역학적 변화를 모사할 수 있다(Moridis et al., 2008a; Moridis et al., 2008b).

TOUGH+HYDRATE는 식 (4)를 통하여 가스하이드레이트로부터 메탄가스의 생산량을 산출할 수 있다(Moridis et al., 2008b).



N_m : Hydration number

여기서, N_m 은 격자구조의 가스하이드레이트를 생성함에 있어 가스 한 분자에 필요한 물 분자 수를 의미하며, 일반적으로 메탄가스는 6의 값을 갖는다. 또한, 격자 상을 따라 물질 및 에너지 평형 방정식(mass and energy balance equation), 질량유속 방정식(mass flux equation), 열 누적 방정식(heat accumulation equation) 3개의 지배방정식을 사용한다. 물질 및 열 평형의 관계는 적분차분법(integral finite difference method)을 이용하며(Pruess et al., 1999), 질량유속(mass flux term)은 Darcy 법칙에 의해 모사가 가능하다(Moridis et al., 2008b).

3.2 미니 고압 Cell 실험 전산수치 모델 구성

이 연구에서는 전산수치해석을 통해 한국지질자원연구원(2016)에서 수행한 미니 고압 Cell 실험결과에 대한 비교·검증을 수행하고 실험조건이 포함된 다양한 가스하이드레이트포화율 조건(10~80%)에서의 해리 거동 분석으로 확장 적용하여 현장시험생산 후보지의 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하고자 하였다. 이를 위해 TOUGH+HYDRATE 전산수치해석 프로그램을 사용하여 실험결과와의 비교·분석을 위한 전산수치 모델을 구축하였다(Fig. 5). 전산수치 모델의 초기조건은 감압을 수행하기 전 실험 Cell의 초기압력을 반영하여 2,900psi(20MPa)로 입력하였으며, 초기온도의 경우 실험시스템의 외부 환경 영향으로 각 미니 Cell 별 초기 온도가 상이하여 실험에서 측정된 각 Cell 별 초기온도를 반영하여 설정하였다. 격자에 대한 물성값은 퇴적시료의 물성을 고려하여 밀도, 열전도도, 비열 등을 입력하였으며, 절대유체투과도, 염 농도, 공극률은 실험에서 측정된 자료를 활용하여 설정하였다(Table 2).

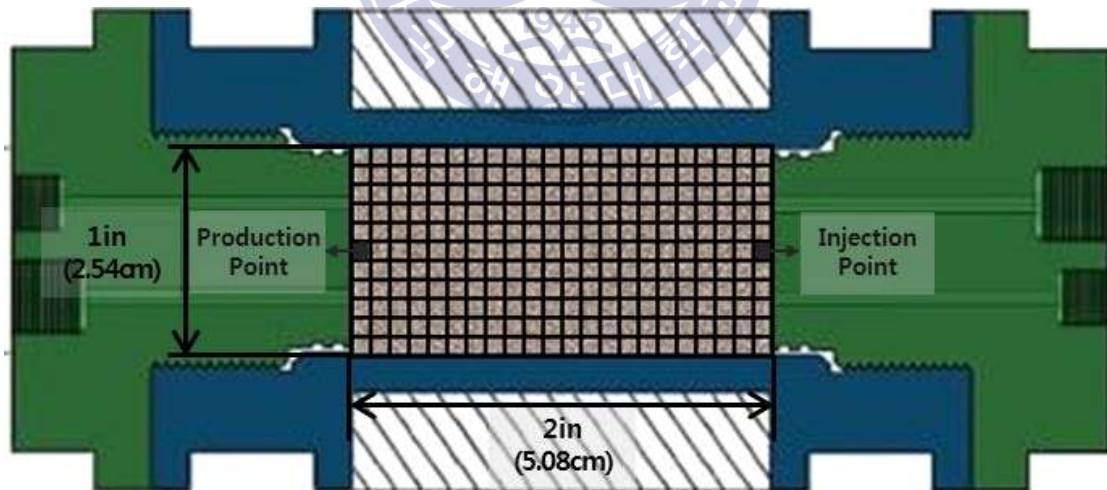


Fig. 5 Plane diagram of numerical simulation model considering mini pressure cell

Table 2 Input parameters of TOUGH+HYDRATE simulator
considering experimental system

Parameters		Input value
Porosity (%)	H1($S_h=0.17$)	44.7
	H2($S_h=0.51$)	42.7
Absolute permeability (md)		1,200
NaCl concentration (%)		3.0
Rock grain density (kg/m^3)		2,650
Rock grain specific heat ($\text{J/kg/}^\circ\text{C}$)		800
Thermal conductivity of fully saturated rocks ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)		1.00
Thermal conductivity of dry rocks ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)		1.45
Initial pressure (psi)		2,900 (20MPa)
Initial temperature ($^\circ\text{C}$)	H1($S_h=0.17$)	16.5
	H2($S_h=0.51$)	16.6
Production time (hr)		40

가스하이드레이트 함유 퇴적층의 물성들 중 유체투과도는 해리 가스 및 물 생산에 직접적인 영향을 미치는 요소로 다양한 연구들을 통해 가스하이드레이트포화율에 따른 유체투과도 변화 식들이 제시되었다(Masuda et al., 1997; Hong, 2003; Kleinberg et al., 2003; Kumar et al., 2010; Konno et al., 2017). 이 연구에서 사용한 가스하이드레이트포화율에 따른 유체투과도 변화식은 식 (5)와 같으며(Masuda et al., 1997), 현장 시험생산 후보지의 퇴적시료를 이용하여 측정된 실험값과 유사한 경향을 보이도록 유체투과도 감소 지수(n)를 10으로 설정하였다(Fig. 6).

$$K = K_o(1 - S_h)^n \quad (5)$$

- K : Permeability reduction by gas hydrate saturation (mD)
- K_o : Absolute permeability (mD)
- n : Permeability reduction exponent
- S_h : Gas hydrate saturation (fraction)

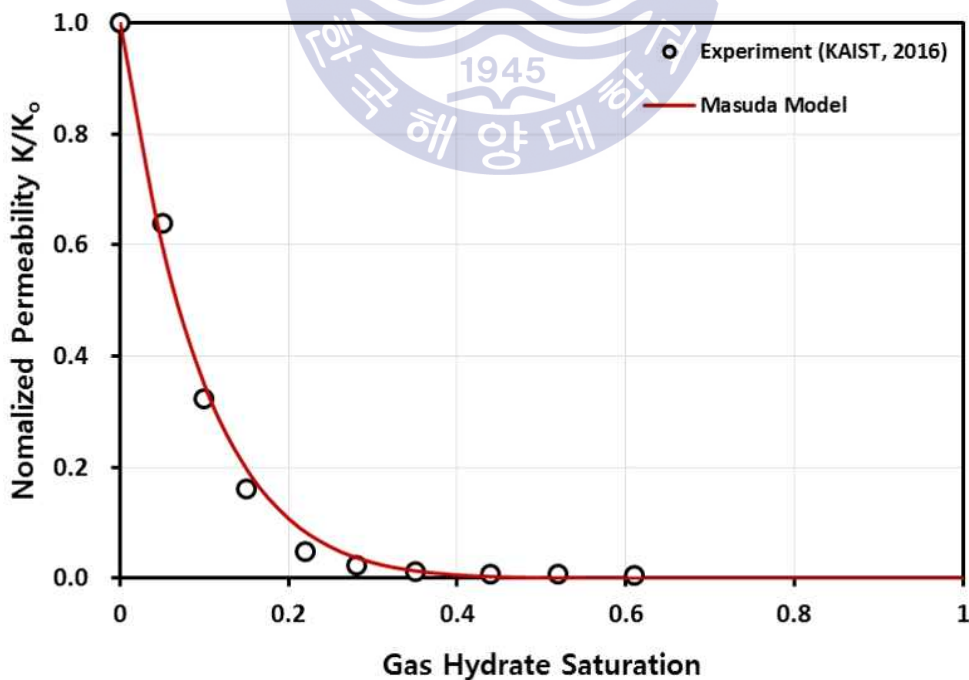


Fig. 6 Change of absolute permeability depending on gas hydrate saturation

물의 상대유체투과도 곡선은 식 (6)~(7)과 같이 van Genuchten-Mualem 모델 (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980)을 활용하였으며, 가스의 상대유체투과도 곡선은 식 (8)과 같은 Modified Stone 모델(Stone, 1970)을 사용하여 Fig. 7과 같이 도출하였다(길성민 등, 2016).

$$S^* = \frac{S_A - S_{irA}}{S_{mxA} - S_{irA}} \quad (6)$$

$$k_{rA} = \begin{cases} \sqrt{S^*} \{1 - (1 - [S^*]^{1/\lambda})^\lambda\}^2 & S_A < S_{mxA} \\ 1 & S_A \geq S_{mxA} \end{cases}, \quad 0 \leq k_{rA} \leq 1 \quad (7)$$

- k_{rA} : Relative permeability for aqueous
- S^* : Normalized aqueous saturations
- S_A : Saturations for aqueous
- S_{irA} : Irreducible aqueous saturations
- S_{mxA} : Maximum aqueous saturations
- λ : Exponent parameter of van Genuchten

$$k_{rG} = \left[\frac{S_G - S_{irG}}{1 - S_{irA}} \right]^{n_G}, \quad 0 \leq k_{rG} \leq 1 \quad (8)$$

- k_{rG} : Relative permeability for gas
- n_G : Exponent
- S_G : Saturations for gas
- S_{irA}, S_{irG} : Irreducible aqueous and gas saturations

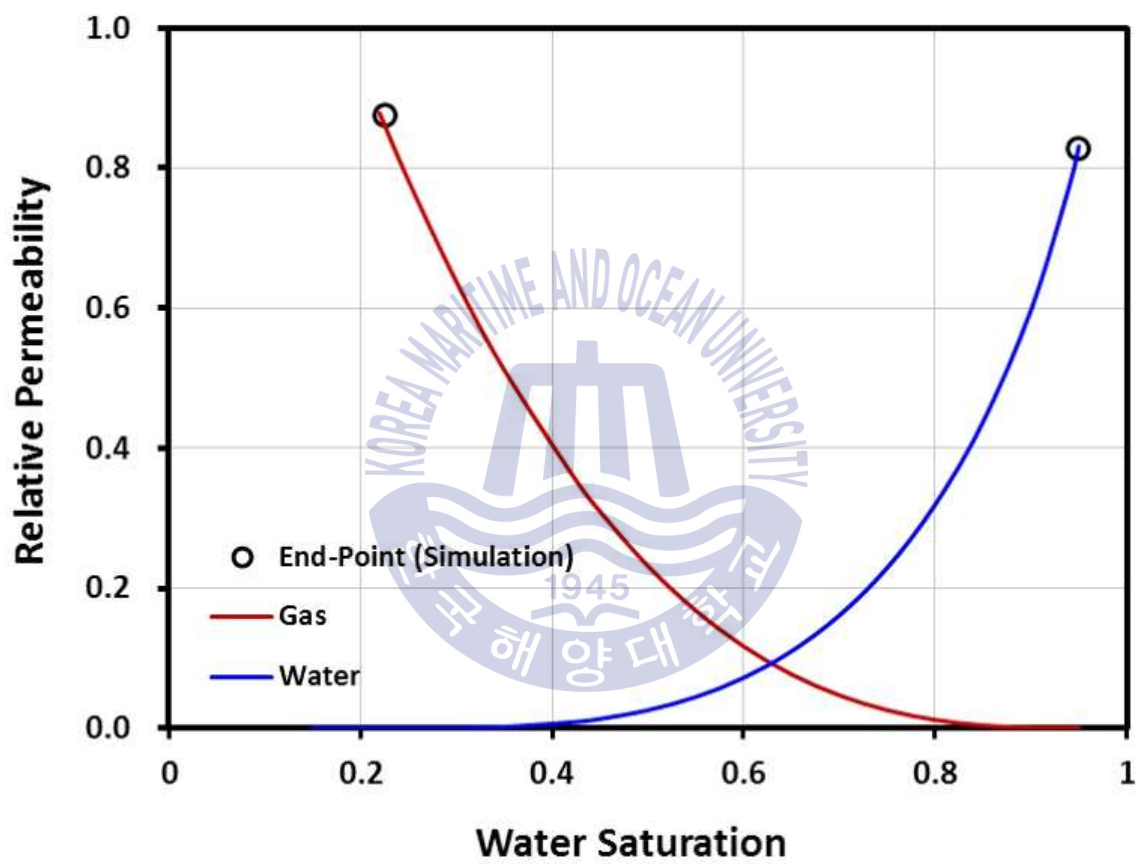


Fig. 7 Relative permeability of gas and water for history matching

3.3 전산수치해석 결과 비교 분석

측정된 CT값을 실험결과와 전산수치해석 결과에 대한 비교·검증을 위하여 활용하고자 하며, 실험과정에서 미니 고압 Cell의 CT값은 물, 가스하이드레이트, 퇴적시료의 밀도값을 반영하여 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

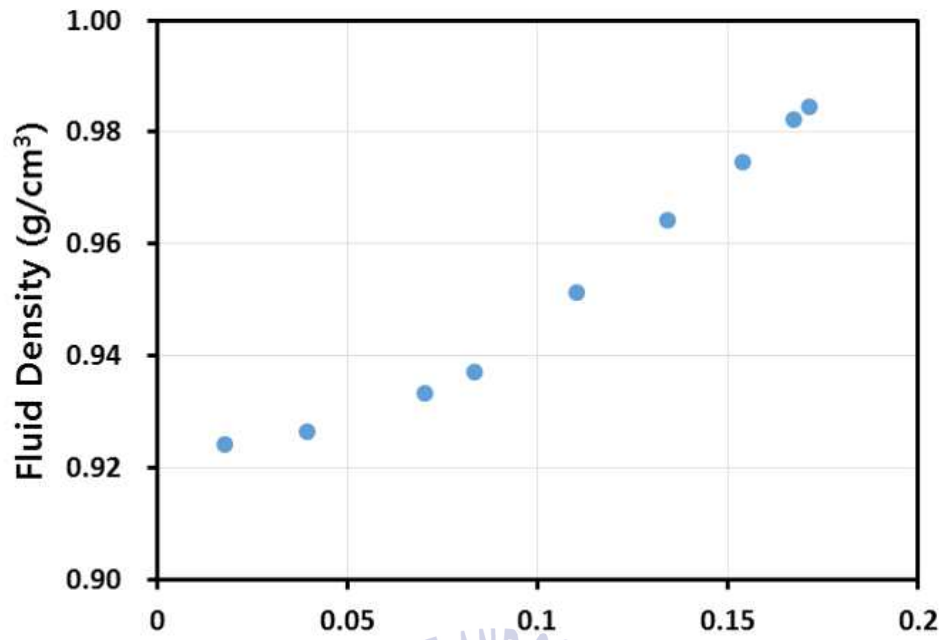
$$CT_{Total} = (CT_{water} \times S_{water}) + (CT_{gh} \times S_{gh}) + CT_{sand} \quad (9)$$

- CT_{gh} : CT value of gas hydrate
- CT_{sand} : CT value of sand sediments
- CT_{Total} : Total CT value
- CT_{Water} : CT value of water
- S_{water} : Saturations for water
- S_{gh} : Saturations for gas hydrate

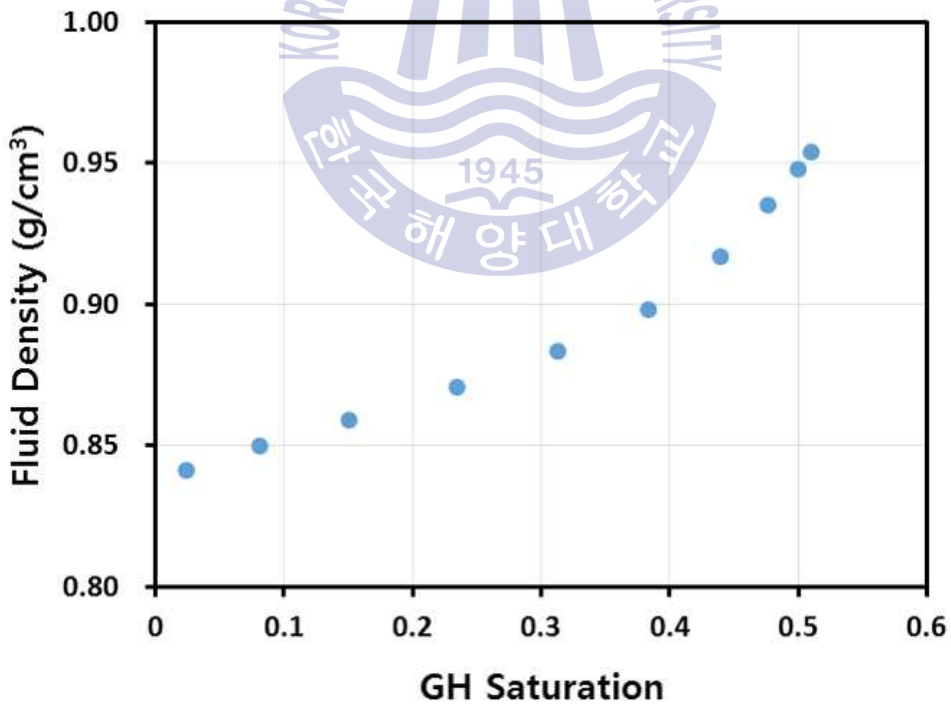
실험 Cell 내의 밀도값 변화를 의미하는 CT값과의 비교를 위하여 전산수치해석 결과를 통해 도출된 각 유체의 포화율을 활용하여 가스하이드레이트를 포함한 유체밀도(fluid density)를 도출하였다. 가스하이드레이트의 밀도는 0.91g/cm^3 을 사용하였으며, 물과 가스의 밀도는 각 압력과 온도 조건을 통해 산출하였다. 전산수치해석 결과로부터 H1($S_h=0.17$), H2($S_h=0.51$)에 대한 유체밀도와 가스하이드레이트포화율의 상관관계를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 식 (10)과 같이 가스하이드레이트포화율과 유체밀도가 비례함으로 가스하이드레이트포화율이 증가함에 따라 유체밀도가 증가하는 양상을 보였다. 따라서 이 연구에서는 전산수치모델의 검증을 위하여 실험에서 측정된 CT값과 시뮬레이션 결과인 유체밀도를 정규화하여 비교하고자 하였다.

$$\rho_{fluid} = (\rho_{gh} \times S_{gh}) + (\rho_{water} \times S_{water}) + (\rho_{gas} \times S_{gas}) \quad (10)$$

- ρ_{fluid} : Fluid density (g/cm^3)
- ρ_{gas} : Gas density (g/cm^3)
- ρ_{gh} : Gas hydrate density (g/cm^3)
- ρ_{water} : Water density (g/cm^3)



GH Saturation
(a) H1 ($S_h=0.17$)



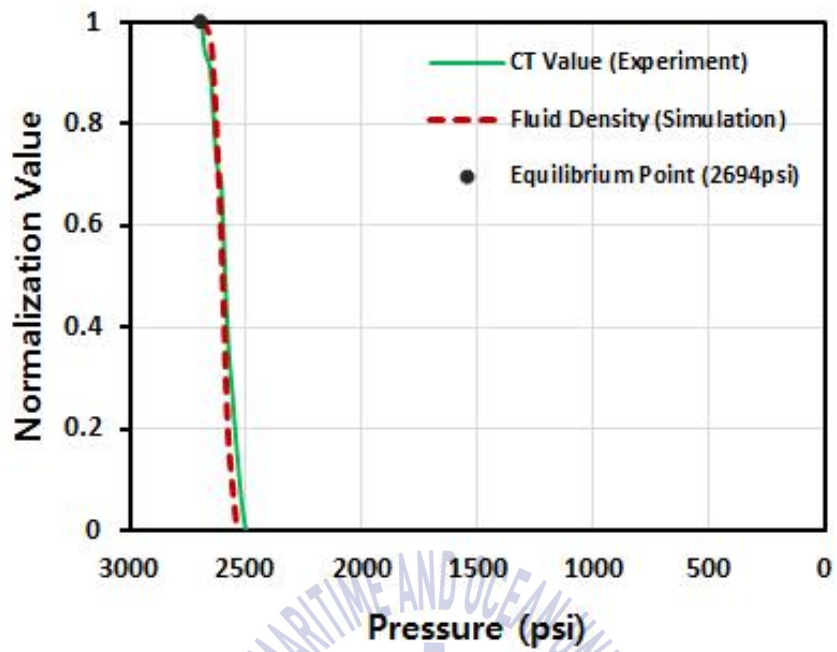
(b) H2 ($S_h=0.51$)

Fig. 8 Correlation of gas hydrate saturation and fluid density

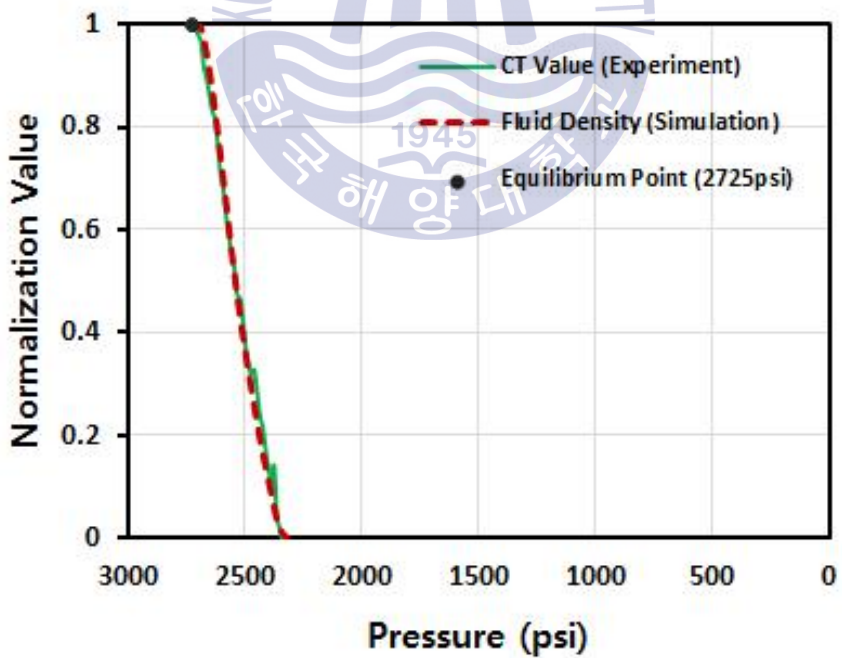
전산수치 모델 검증을 위해 실험에서 측정한 CT값과 전산수치해석 결과로부터 도출한 유체밀도를 정규화하여 비교·분석하였으며, 미국 Colorado School of Mines에서 개발한 CSMHYD 프로그램을 활용하여 각 실험 Cell 별 조건에서의 가스하이드레이트 해리 압력을 파악하였다. 실험 Cell 별 가스하이드레이트 해리 압력조건과 가스하이드레이트 해리가 완료되는 시점에서의 CT값과 유체 밀도에 대한 정규화를 수행하여 감압에 따른 실험결과와 전산수치해석 결과를 비교·분석하였다.

그 결과 감압에 따른 유체밀도 변화와 CT값의 변화가 비교적 유사한 양상을 보였으며(Fig. 9), 두 실험 Cell 모두 평형 압력 조건에서 가스하이드레이트 해리가 이루어지는 것을 파악할 수 있었다. 또한, 실험 Cell 내 감압에 따른 가스하이드레이트 해리 양상을 파악하고자 실험에서 측정된 CT값 분포와 전산수치 해석을 통해 도출된 유체밀도 및 가스하이드레이트포화율 분포 변화를 비교하였다(Fig. 10, Fig. 11). 이를 통해 가스하이드레이트 해리가 실험 Cell 바깥경계에서부터 시작되었으며, 가스하이드레이트 해리가 완료되는 압력이 실험결과와 유사한 것을 확인할 수 있었다.

구축된 전산수치 모델을 통해 각 실험 Cell 내 가스하이드레이트 해리에 따른 압력, 온도, 가스하이드레이트포화율, 가스포화율에 대한 변화를 파악하였다(Fig. 12, Fig. 13). 압력의 경우 두 실험 Cell 모두 빠른 압력전파로 인하여 실험 Cell 내 모든 구간에서 동일한 압력으로 감소하는 것을 파악할 수 있었다. 온도 분포의 경우 가스하이드레이트 해리에 따른 흡열반응의 영향으로 온도감소가 바깥 경계부근에서부터 발생하였으며, 상대적으로 초기 가스하이드레이트포화율이 높은 H2($S_h=0.51$)에서 더 낮은 온도까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 가스하이드레이트포화율 및 가스포화율 분포를 통해 H1($S_h=0.17$)의 경우 가스하이드레이트 해리 완료까지 약 5시간이 소요되었으며, H2($S_h=0.51$)은 약 7시간 이후에 가스하이드레이트 해리가 완료되었다. 이를 통해 상대적으로 초기 가스하이드레이트포화율이 높은 조건에서는 해리 완료 시점까지 시간이 더 소요되는 것을 파악할 수 있었다.



(a) H1 ($S_h=0.17$)



(b) H2 ($S_h=0.51$)

Fig. 9 Comparison of Experiment and simulation result

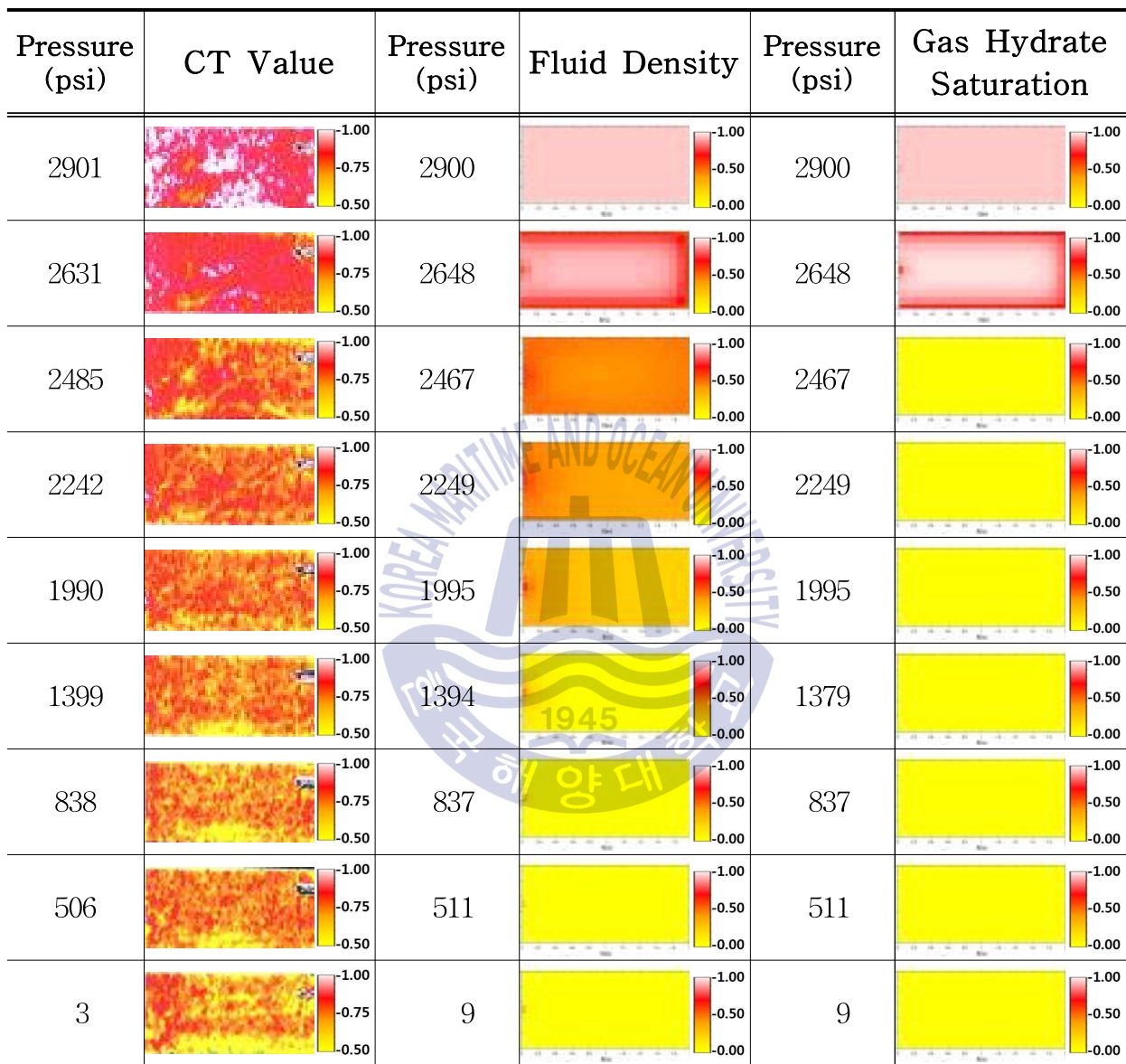


Fig. 10 CT value, fluid density and gas hydrate saturation distribution of H1($S_h=0.17$)

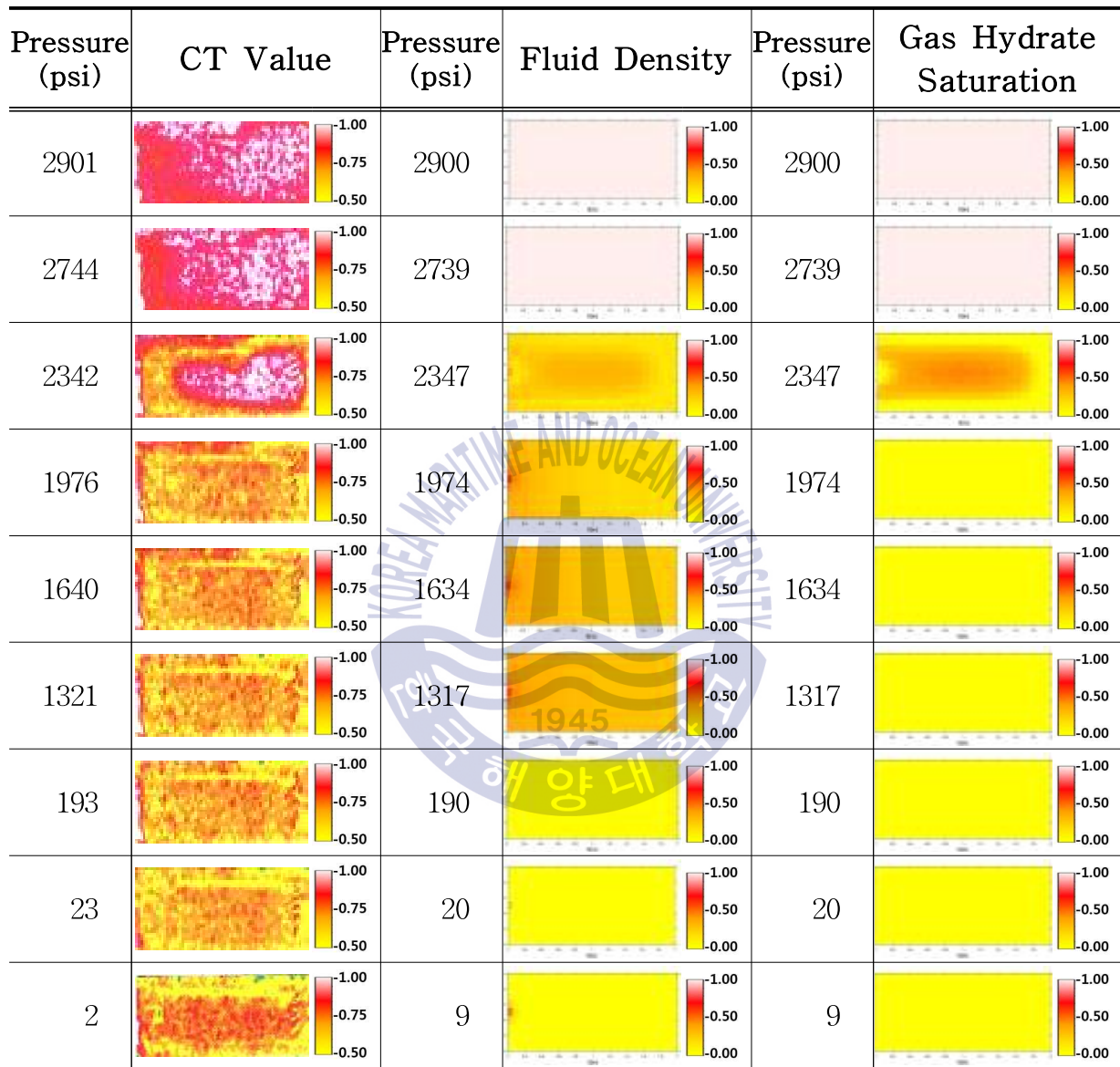


Fig. 11 CT value, fluid density and gas hydrate saturation distribution of H₂(S_h=0.51)

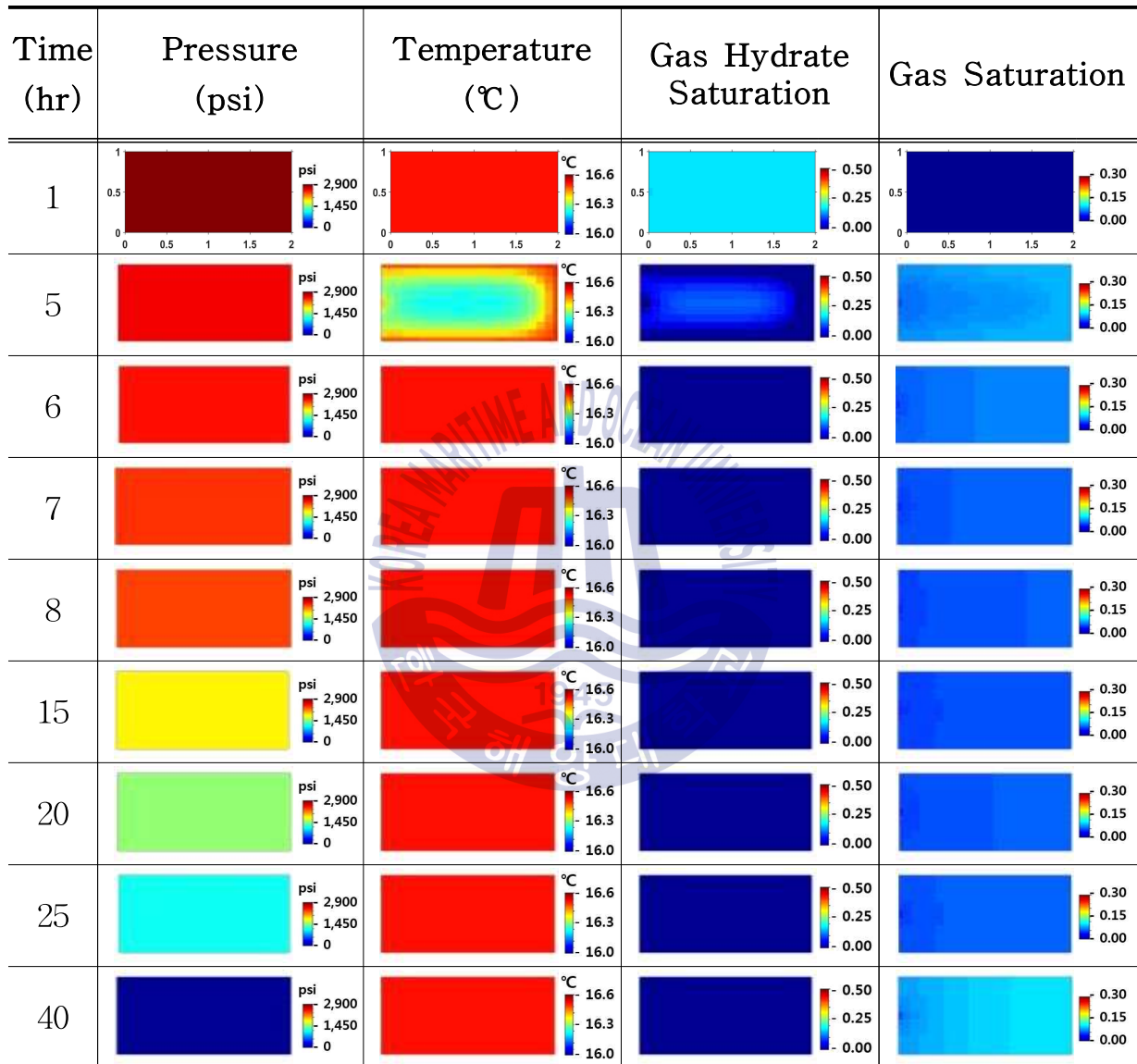


Fig. 12 Spatial distribution of H1($S_h=0.17$)

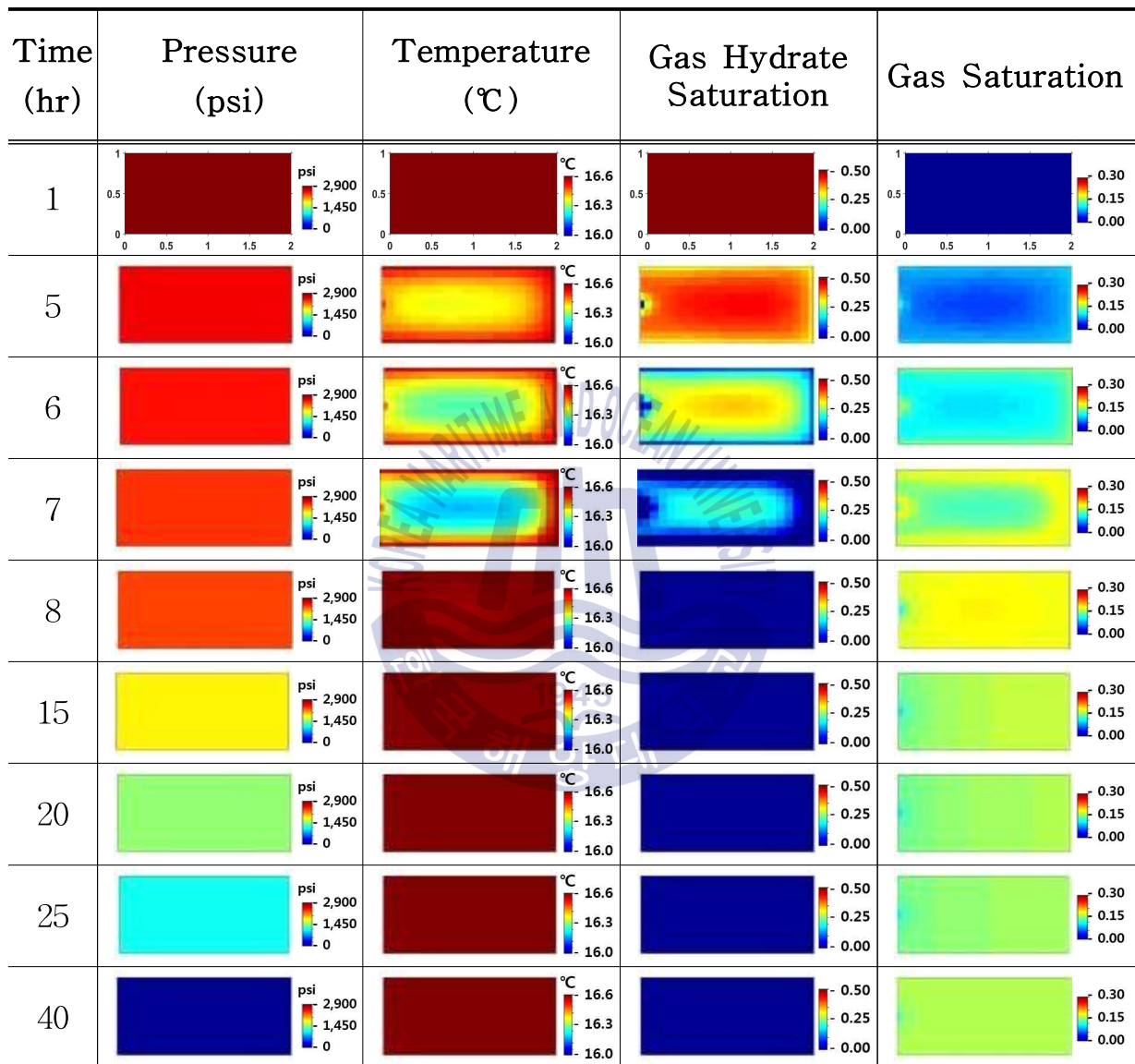


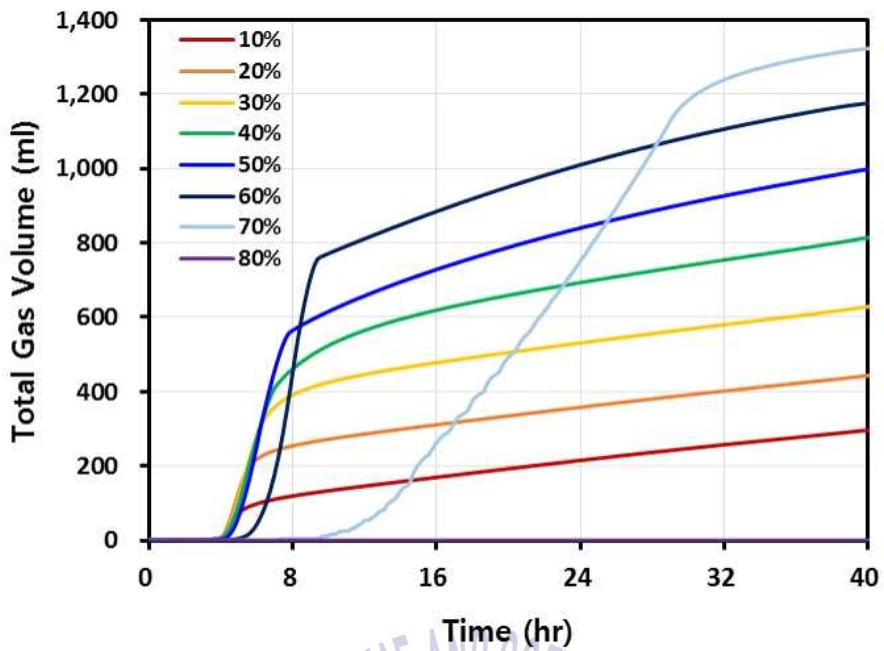
Fig. 13 Spatial distribution of H₂(S_n=0.51)

3.4 다양한 가스하이드레이트포화율 조건에 따른 전산수치해석

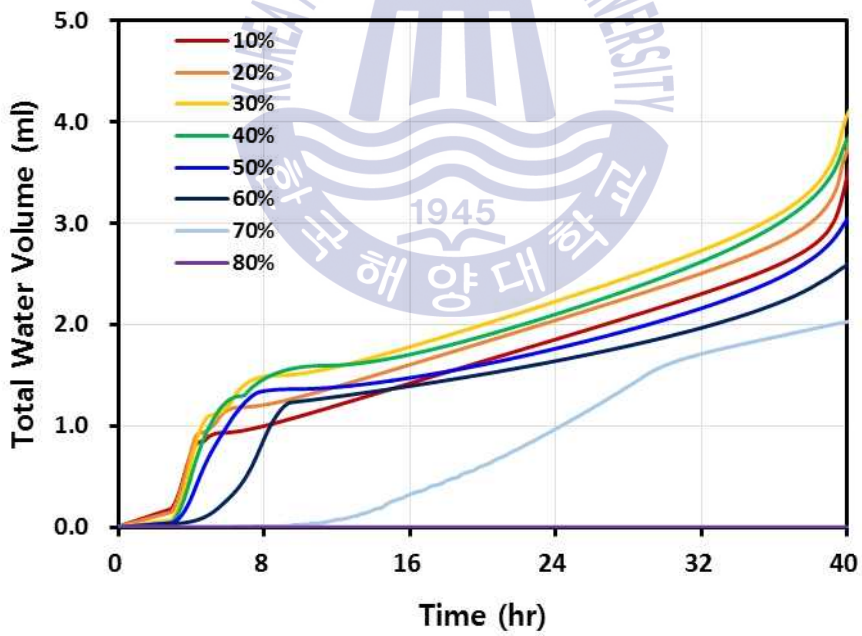
실험결과와의 비교·검증으로부터 구축된 전산수치 모델을 활용하여 다양한 가스하이드레이트포화율 조건(10~80%)에서의 해리 거동과 생산성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 $H_2(S_h=0.51)$ 와 동일한 초기온도 및 압력, 퇴적층의 물성, 감압조건에서 전산수치해석을 수행하였으며, Fig. 14와 같이 가스 및 물의 생산 변화를 파악하였다.

가스하이드레이트포화율이 증가함에 따라 40시간동안 생산되는 총 가스의 양은 증가하였으며, 80% 포화율 조건에서는 가스 및 물 생산이 이루어지지 않았다. 또한 약 50% 이상의 조건에서부터 가스하이드레이트 해리가 지연되어 가스 및 물 생산이 늦어지는 경향을 보였다. Fig. 15와 같이 가스 생산량을 비교해본 결과 70% 이상의 조건에서는 가스 생산이 불안정한 것을 파악하였으며, 60% 이상에서 해리 가스의 생산으로 인하여 가스 생산이 증가하는 시점이 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 50~60% 가스하이드레이트포화율에서 한계 가스하이드레이트포화율이 존재할 것으로 사료된다.

한계 가스하이드레이트포화율로 사료되는 50%와 60%에서의 압력, 온도, 가스하이드레이트포화율, 가스포화율에 대한 분포를 파악하였다(Fig. 16, Fig. 17). 가스하이드레이트포화율 50%에서는 감압적용에 따른 압력전파가 빠르게 발생하여 실험 Cell 내 모든 구간에서 동일하게 압력 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 60% 조건에서는 초기의 낮은 유체투과도로 인해 압력전파가 느리게 발생하는 것을 파악할 수 있었다. 온도분포의 경우 두 포화율 조건에서 가스하이드레이트 해리에 따른 온도 감소현상을 확인할 수 있으며, 가스하이드레이트포화율과 가스포화율 분포를 통해 60% 조건에서는 압력전파의 지연으로 인해 가스하이드레이트 해리가 생산지점 부근에서부터 발생하는 것을 파악할 수 있었다.



(a) Gas



(b) Water

Fig. 14 Cumulative production depending on gas hydrate saturation

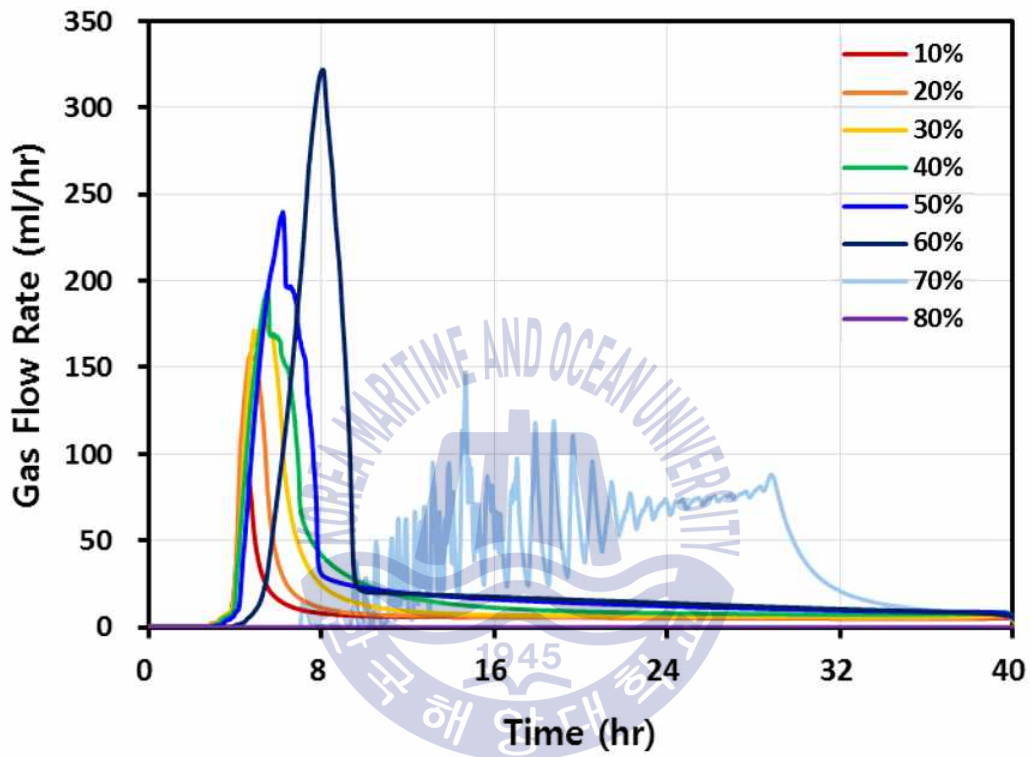


Fig. 15 Dissociation gas rate depending on gas hydrate saturation

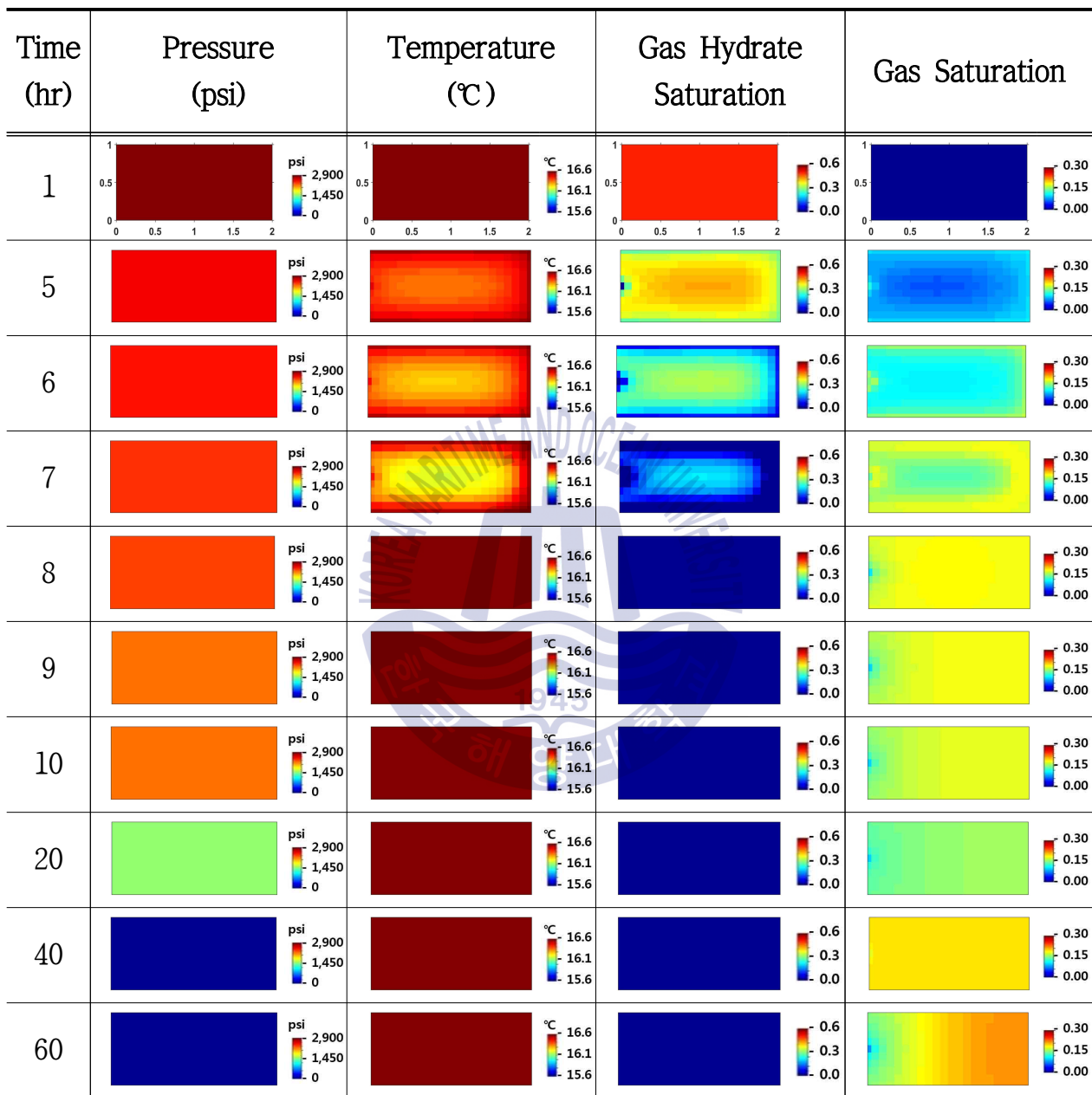


Fig. 16 Spatial distribution of 50% gas hydrate saturation

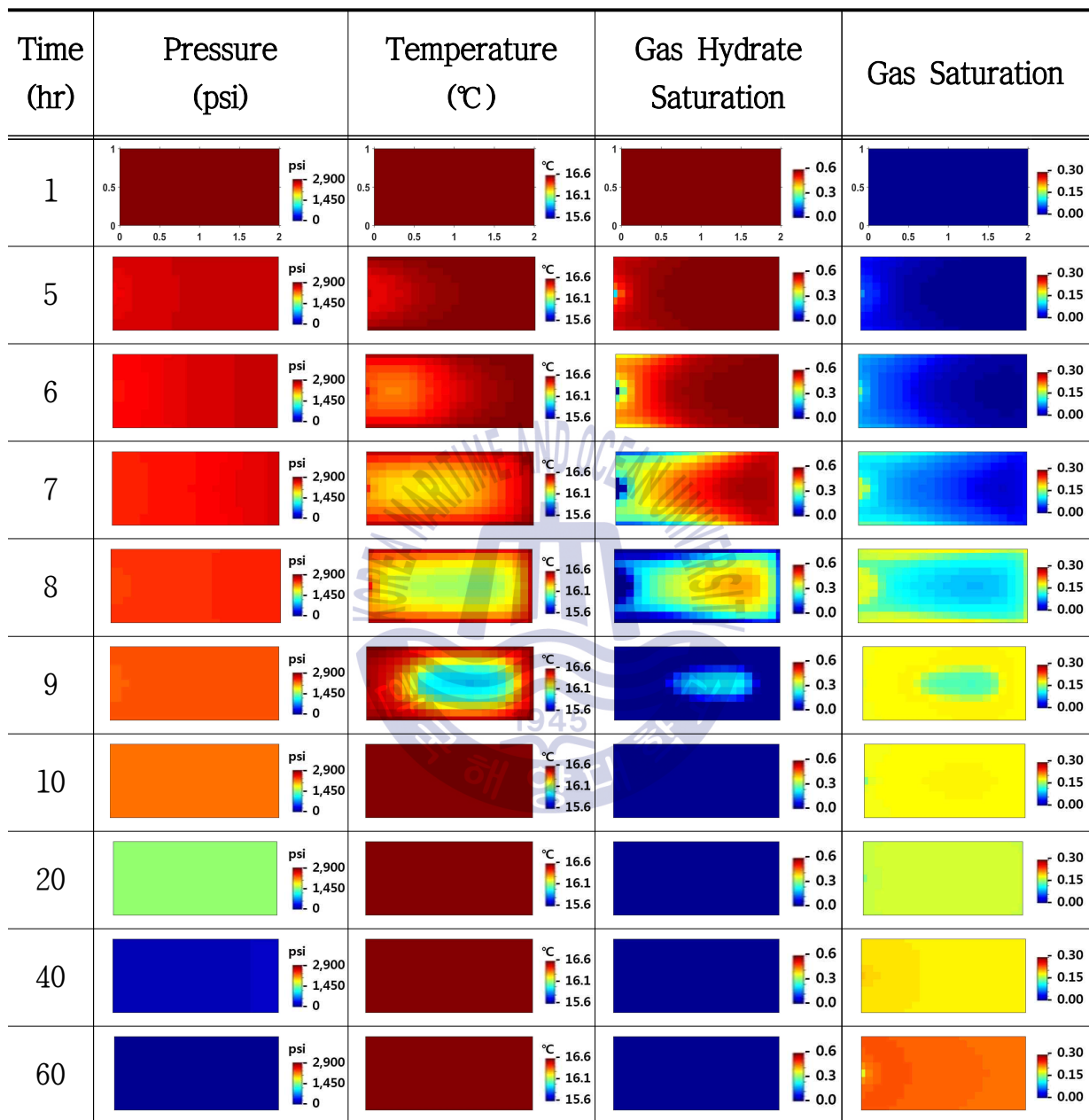
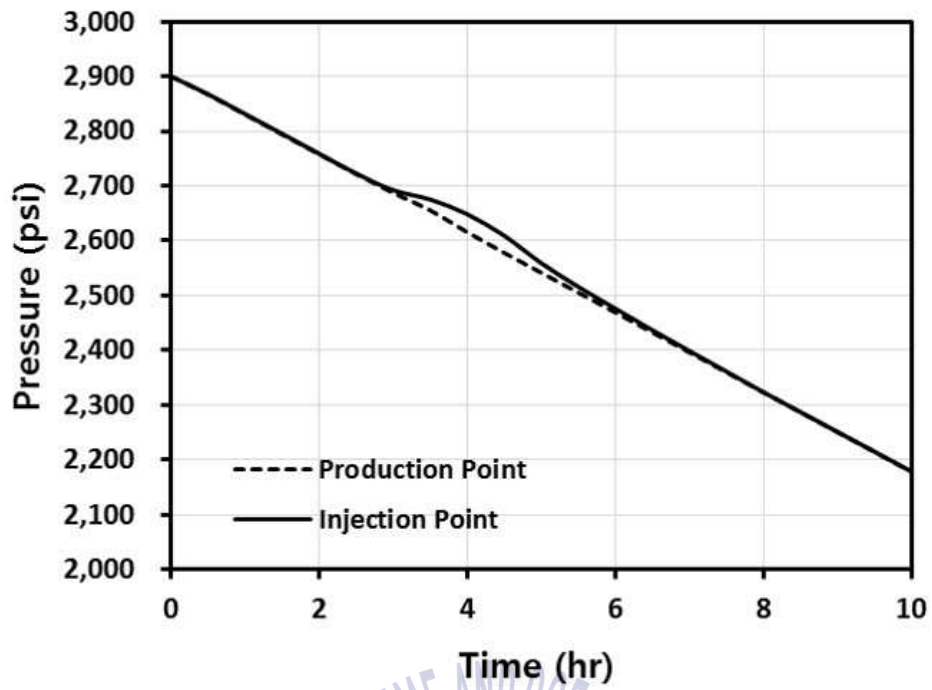


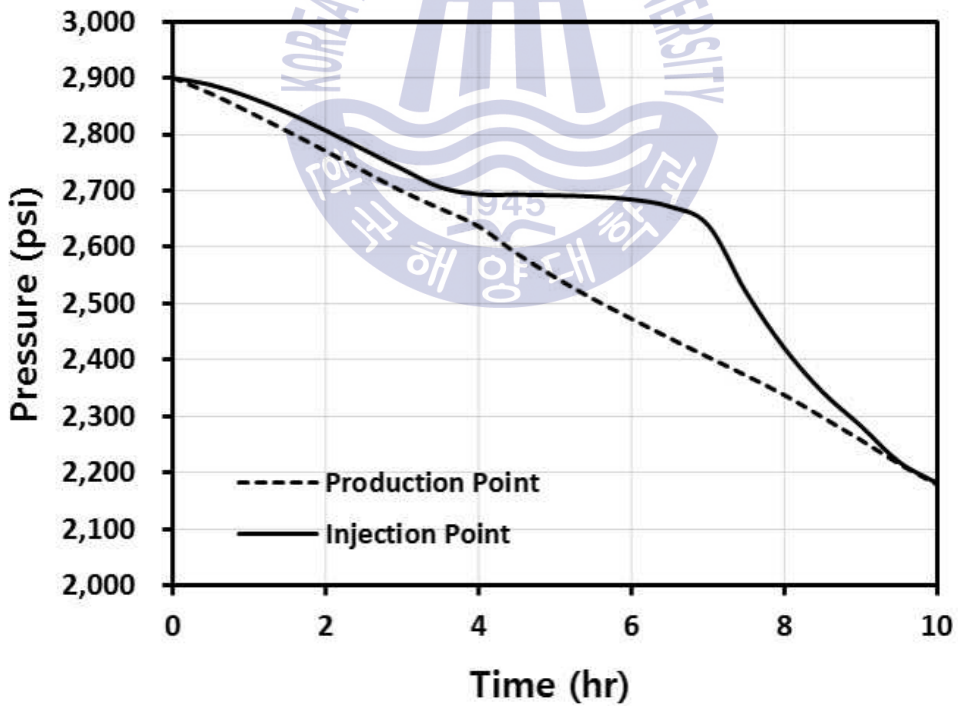
Fig. 17 Spatial distribution of 60% gas hydrate saturation

Fig. 18은 실험시스템의 생산지점과 주입지점에서 시간에 따른 압력변화를 나타내었으며, 50% 조건에서 가스하이드레이트 해리에 의해 약 4시간에서 생산지점과 주입지점의 압력차가 미소하게 발생하였다. 60% 포화율 조건에서는 낮은 유체투과도로 인해 압력전파가 지연되는 것을 확인할 수 있었으며, 해리가 시작되는 약 4시간부터 두 지점의 압력차가 커지기 시작하였다. 감압 적용 7시간 이후에는 두 지점의 압력차가 약 210psi까지 발생하였다. 가스하이드레이트 해리의 영향으로 유체투과도가 회복되어 두 지점의 압력차가 감소하며, 가스하이드레이트 해리가 완료된 10시간에서는 실험시스템 내 모든 구간의 압력이 동일하게 감소하였다. Fig. 19는 생산지점과 중앙지점($x=1in$, $y=0.5in$), 주입지점의 가스하이드레이트 해리에 따른 온도변화를 나타냈었으며, 가스하이드레이트포화율이 큰 60% 조건에서 실험시스템 내 온도 감소는 더 크게 발생하는 것을 파악할 수 있었다.



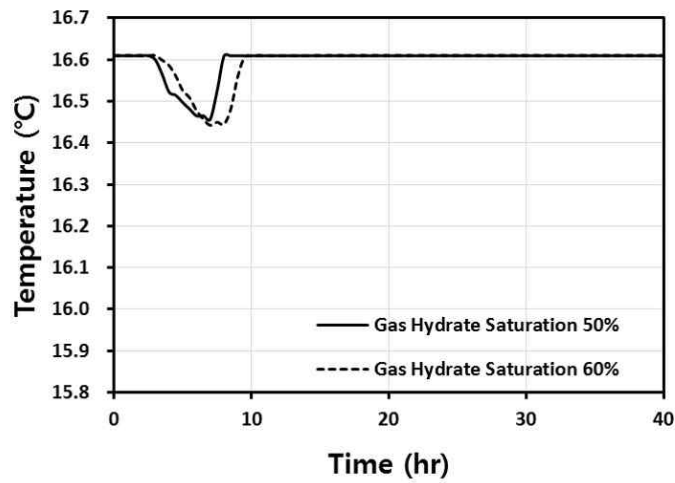


(a) Gas hydrate saturation 50%

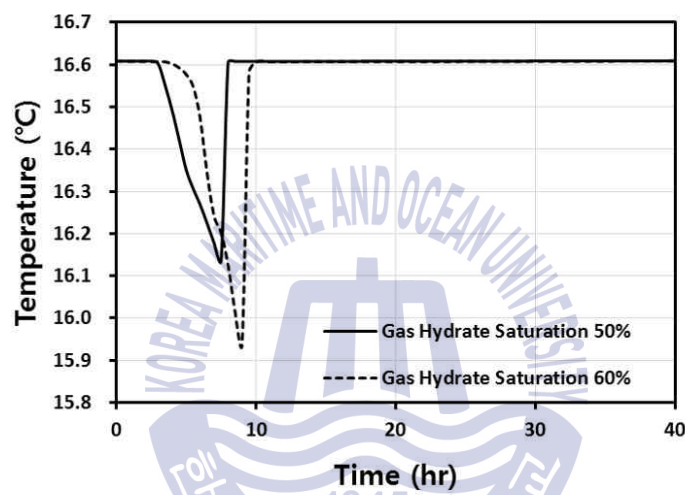


(b) Gas hydrate saturation 60%

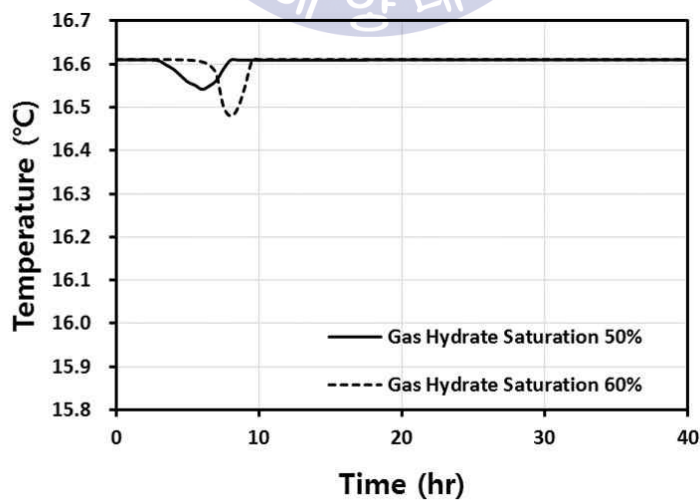
Fig. 18 Pressure changes of mini pressure cell according to gas hydrate saturation



(a) Production point



(b) Middle point of mini pressure cell



(c) Injection point

Fig. 19 Temperature changes of mini pressure cell according to gas hydrate saturation

제 4 장 중규모 생산모사 실험 전산수치해석

미니 고압 Cell 실험 및 전산수치해석을 통해 파악된 한계 가스하이드레이트 포화율에 대하여 현장 적용성 확장을 위해 구축된 중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템을 반영한 전산수치 모델(길성민 등, 2016)을 활용하여 가스하이드레이트포화율 50%와 60%에서의 생산성 및 해리 거동을 파악하고자 하였다.

4.1 전산수치 모델 입력변수 설정

중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템을 반영한 전산수치 모델은 실험시스템의 형상과 유동의 흐름을 고려하기 위해 원통형(cylindrical) 격자로 설정하였으며, 실험시스템의 높이와 생산정 크기를 반영하여 전산수치 모델을 구성하였다(Fig. 20). 또한, 실험시스템 내 온도를 유지하기 위한 순환시스템은 전체 시스템의 바깥경계 부분에 가상격자를 만들어 전산수치 모델에 반영하였다. 전산수치 모델의 입력 자료는 미니 고압 Cell 실험에서 사용된 모래 퇴적시료에 대한 물성 및 초기압력, 초기온도조건을 반영하였으며(Table 3), 가스하이드레이트포화율 50%와 60% 조건에 따른 전산수치해석을 수행하였다.

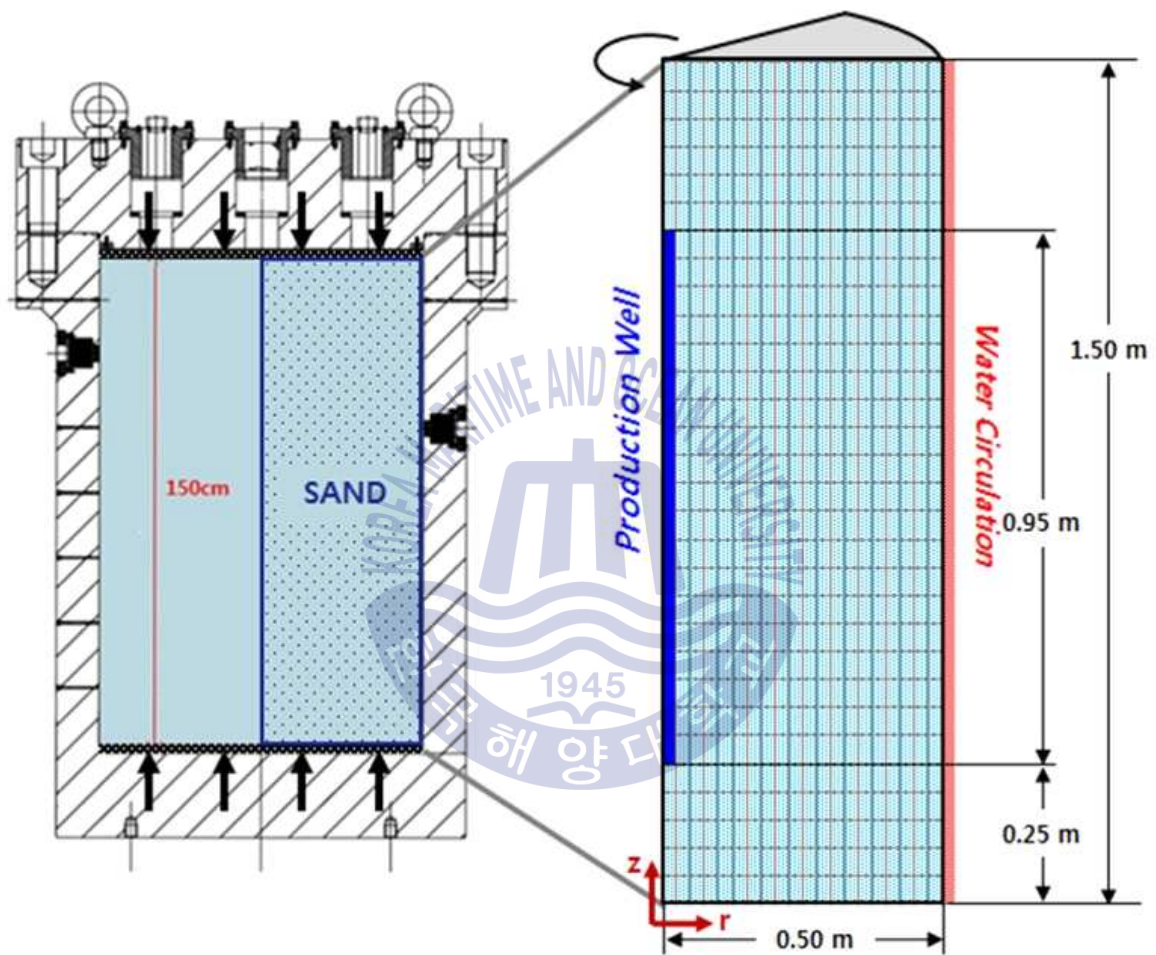


Fig. 20 Schematic diagram of numerical simulation model reflecting the gas hydrate experimental production system

Table 3 Input parameters of TOUGH+HYDRATE simulator

Parameters	Input value
Porosity (%)	46.10
Absolute permeability (md)	1,200
NaCl concentration (%)	3.00
Rock grain density (kg/m ³)	2,650
Rock grain specific heat (J/kg/°C)	800
Thermal conductivity of fully saturated rocks (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	1.00
Thermal conductivity of dry rocks (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	1.45
Initial pressure (MPa)	20.00
Initial temperature (°C)	16.00
Production time (hr)	150

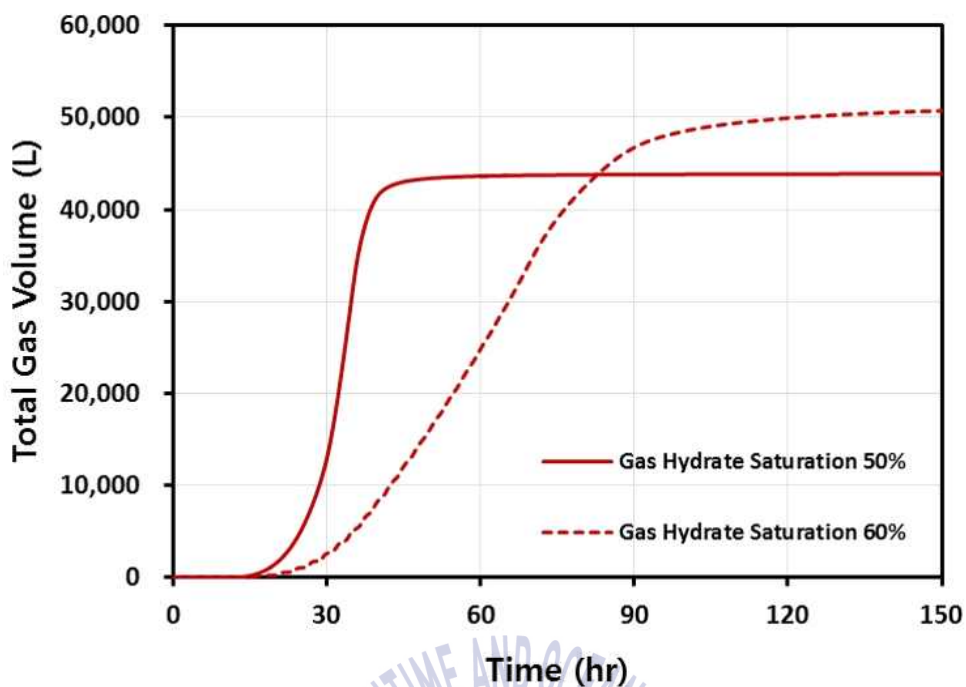
4.2 한계 가스하이드레이트포화율 조건의 전산수치해석 결과

각 가스하이드레이트포화율 조건에서 150시간 동안 생산된 총 가스 및 물 생산량은 Table 4와 같이 포화율 60%에서 총 가스 생산량이 포화율 50%에 비해 더 높은 것을 확인할 수 있었다. Fig. 21과 같이 각 가스하이드레이트포화율 조건에서 가스 및 물 생산 경향을 비교하였으며, 포화율 50%에서 약 15시간부터 가스가 생산되기 시작하여 감압이 완료되는 40시간 이후 생산량은 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 포화율 60%에서는 약 20시간부터 가스가 생산되기 시작하는 것을 확인할 수 있으며, 40시간 이후에도 가스가 지속적으로 생산되어 약 120시간 이후에 생산된 가스의 양이 일정하게 유지되었다. 물 생산의 경우 가스 생산 경향과 유사하게 50% 포화율 조건에서 상대적으로 빠르게 물 생산이 이루어지는 것을 확인할 수 있으며, 60% 포화율 조건의 경우 150시간동안 지속적으로 물 생산이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

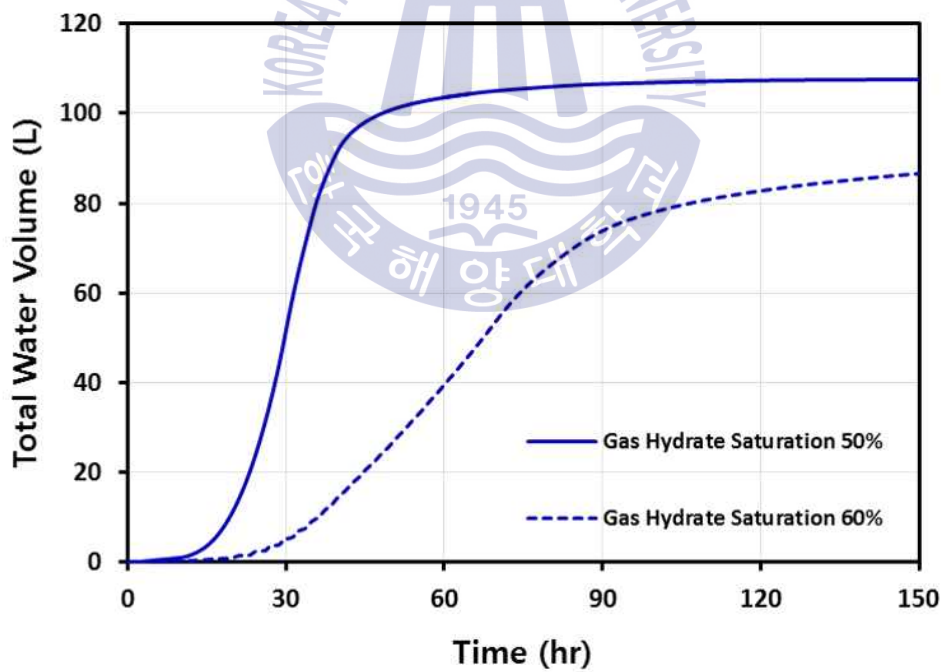
따라서 미니 고압 Cell 연구를 통해 파악한 한계 가스하이드레이트포화율과 유사하게 중규모 실험시스템에서도 가스하이드레이트포화율 50% 이상의 조건에서 가스 및 물 생산량이 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 가스하이드레이트 생산이 장기간동안 이루어 질 경우 가스하이드레이트포화율이 높은 지점에서 생산이 이루어지는 것이 효과적이지만, 단기간에 생산이 이루어지는 현장시험생산의 경우 비교적 초기에 가스가 생산되는 한계 가스하이드레이트포화율 이하의 조건이 효과적일 것으로 사료된다.

Table 4 Total gas and water production at 150hr

Gas Hydrate Saturation (%)	50	60
Total Gas production (ml)	43,880	50,808
Total Water Production (ml)	107	87



(a) Total gas production



(b) Total water production

Fig. 21 Gas and water production of gas hydrate experimental production system

각 가스하이드레이트포화율 조건에 따른 실험시스템 내 압력, 온도, 가스하이드레이트포화율, 가스포화율에 대한 분포를 파악하였다(Fig. 22~25). 압력 분포 변화를 통해 감압법 적용에 따른 실험시스템 내 생산정에서 부터 압력 감소가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 초기 포화율이 높은 60% 조건에서는 포화율에 따른 유체투과도 감소 현상으로 인하여 압력 전파가 상대적으로 느리게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 가스하이드레이트 해리에 따른 실험시스템 내 온도 분포 변화를 통해 50% 포화율 조건에서 온도감소가 60% 보다 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 포화율 분포를 통해 가스하이드레이트 해리가 생산정 주변에서 부터 이루어지며, 60% 조건에서 압력전파의 지연으로 인하여 가스하이드레이트 해리가 상대적으로 느리게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

온도분포를 통해 미니 고압 Cell 실험과 달리 초기 포화율이 50% 조건에서 해리에 따른 온도감소가 더 크게 발생하여 Fig. 26과 같이 실험시스템의 생산정 부근과 중앙지점, 바깥경계 부근에서의 온도변화를 파악하였다. 그 결과 50% 조건에서는 생산정 지점에서의 온도감소가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 60%의 경우 가스하이드레이트 해리가 느리게 발생하여 흡열반응으로 감소된 온도가 실험시스템 바깥경계부에 존재하는 순환시스템에 의해 회복되는 것을 파악하였다. 따라서 가스하이드레이트 해리의 지연으로 인하여 포화율 50%에서 온도감소가 포화율 60%보다 크게 발생한 것으로 사료된다.

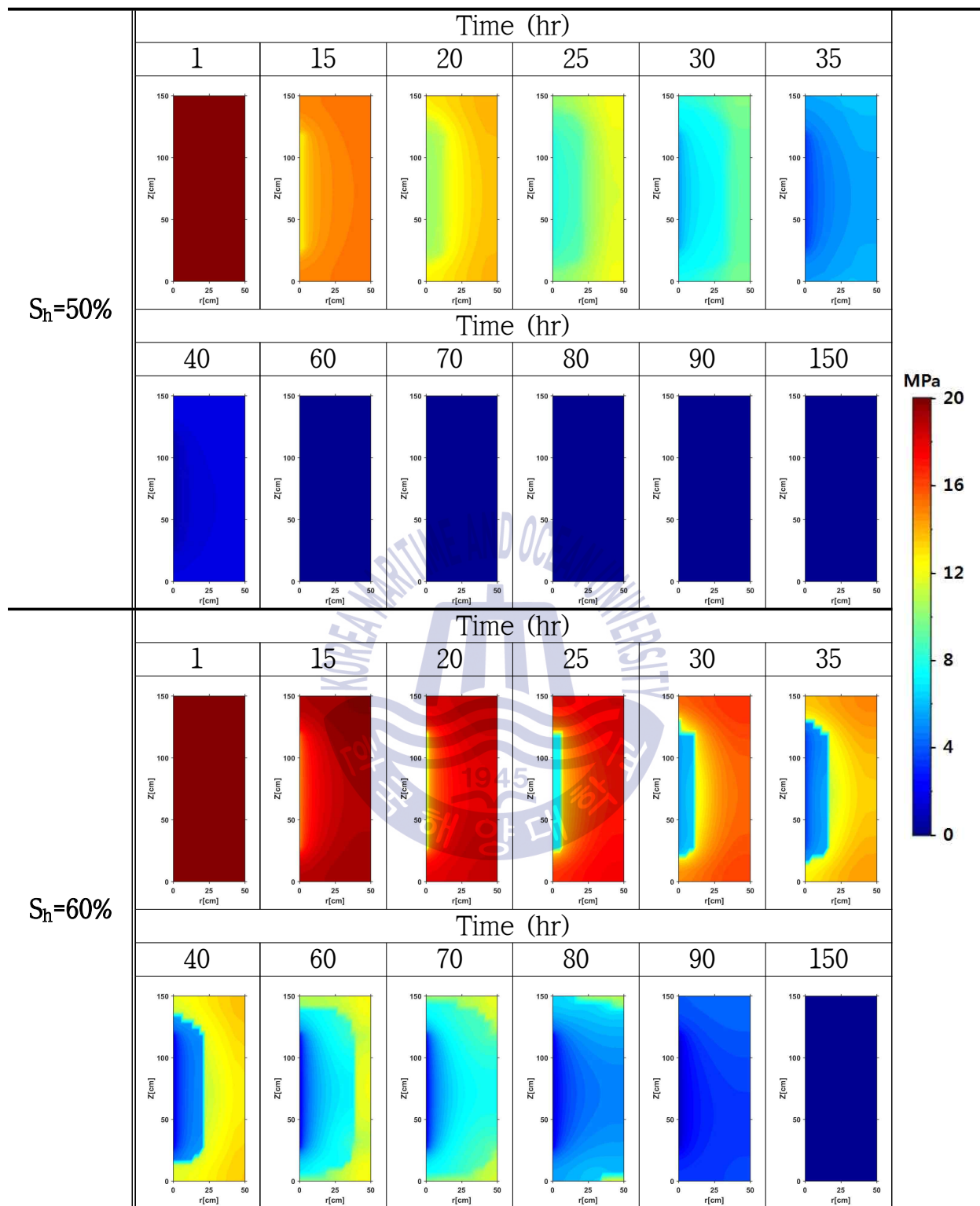


Fig. 22 Spatial distribution of pressure at gas hydrate experimental production system

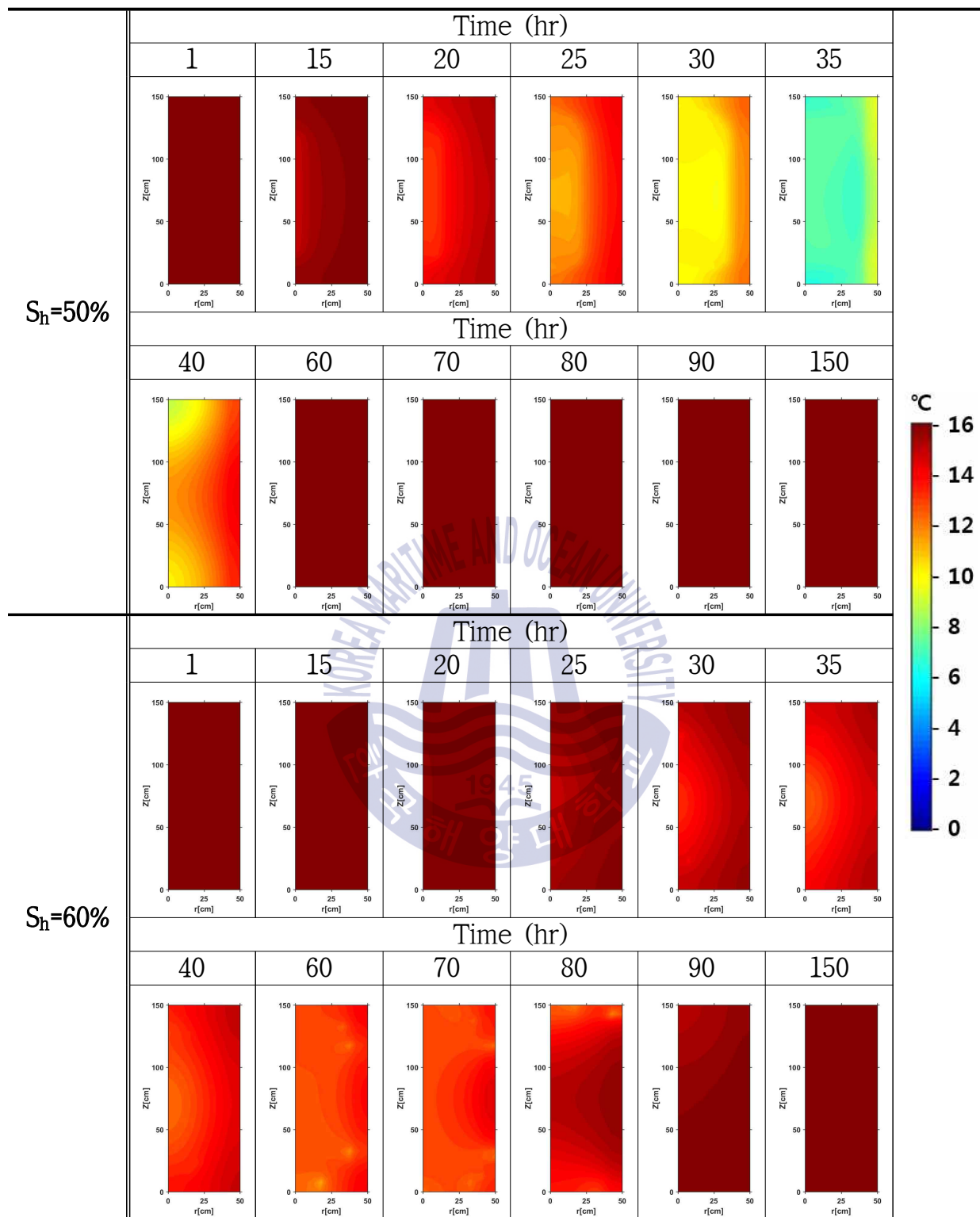


Fig. 23 Spatial distribution of temperature at gas hydrate experimental production system

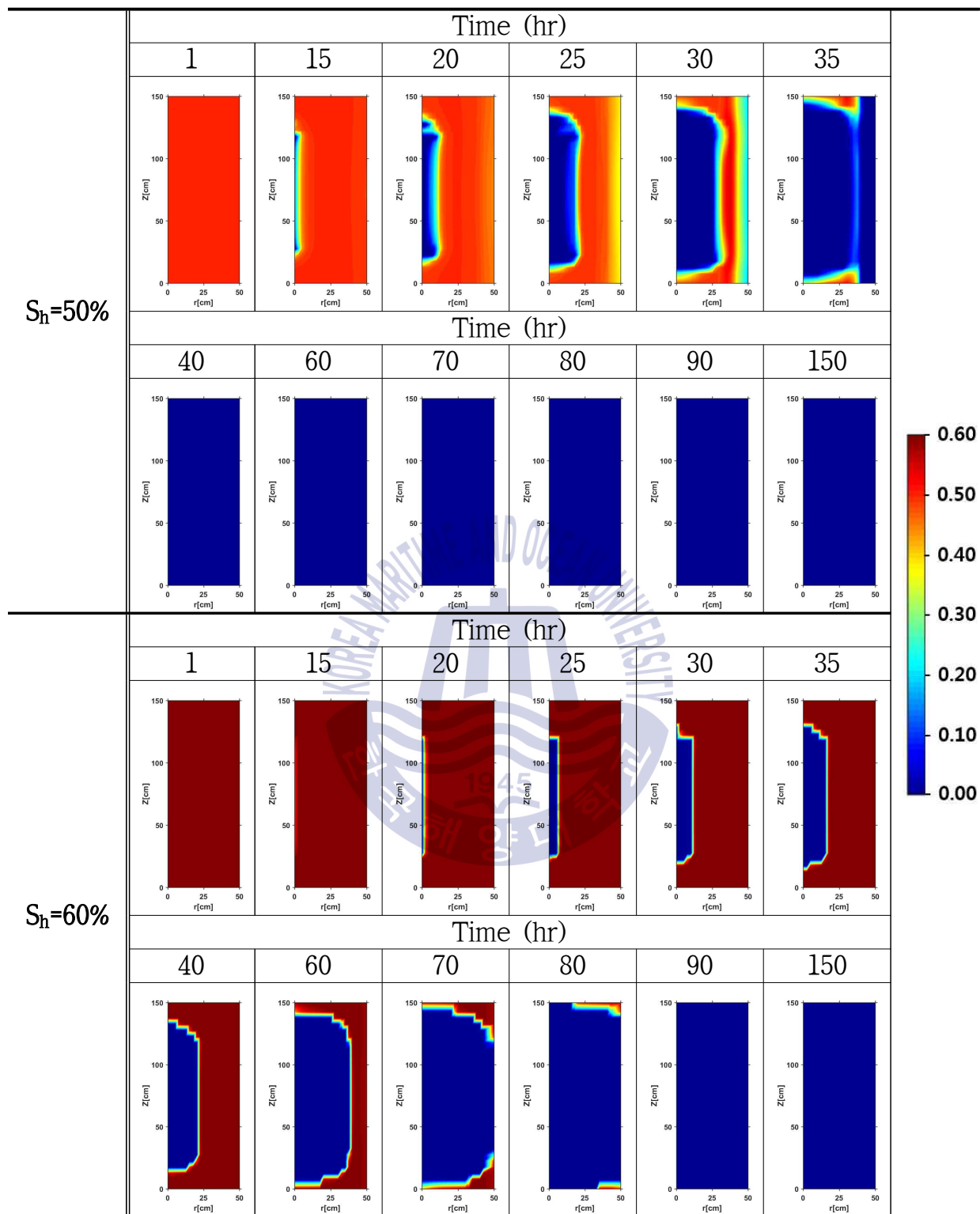


Fig. 24 Spatial distribution of gas hydrate saturation at gas hydrate experimental production system

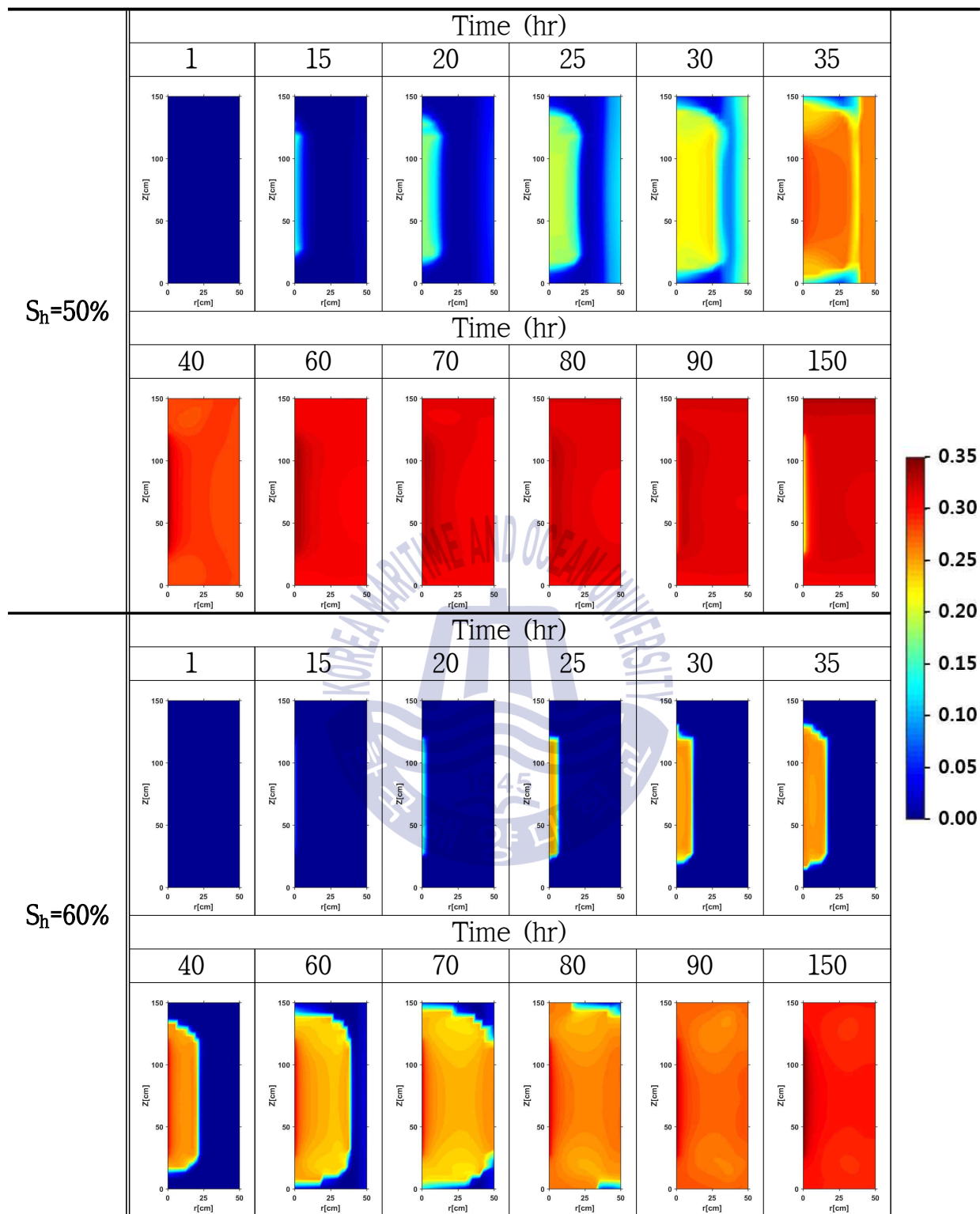
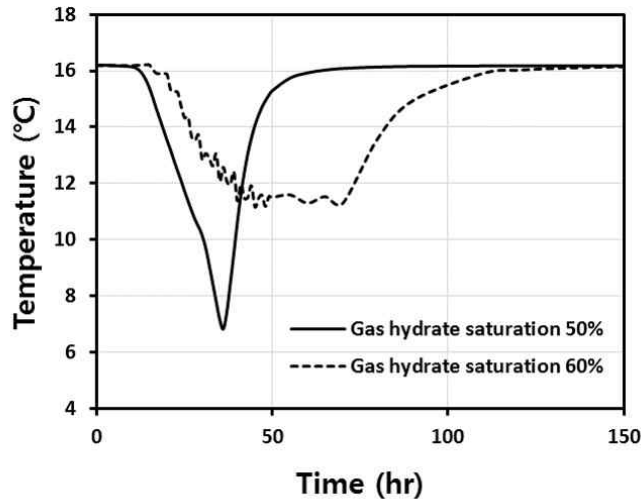
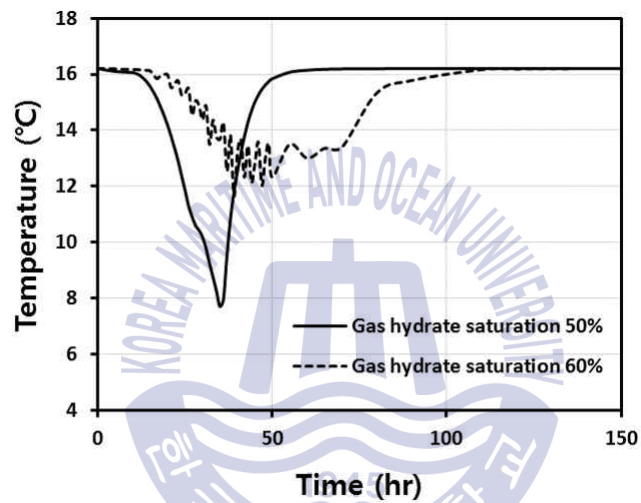


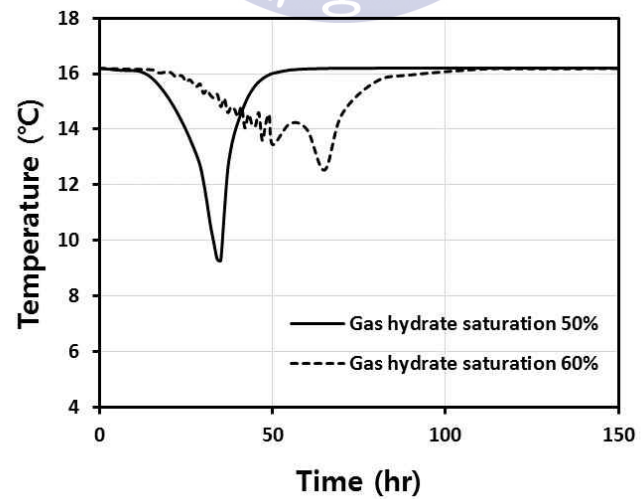
Fig. 25 Spatial distribution of gas saturation at gas hydrate experimental production system



(a) Production well



(b) Middle point of experimental system



(c) Outside boundary

Fig. 26 Temperature changes at different points of gas hydrate experimental production system

제 5 장 결 론

이 연구에서는 미니 고압 Cell 실험을 모사한 전산수치 모델을 구축하였으며, 실험결과와의 비교·분석을 통해 구축된 전산수치 모델에 대한 검증을 수행하였다. 구축된 전산수치 모델을 활용하여 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하고자 다양한 가스하이드레이트포화율 조건에 따른 생산성 변화를 파악하였으며, 현장 적용성 확장을 위해 중규모 실험시스템을 반영한 전산수치해석을 수행하였다.

1. 실험결과에 대한 비교·분석을 수행하고자 미니 고압 Cell 실험시스템을 모사한 전산수치 모델을 구축하였다. 가스하이드레이트 해리 양상을 파악하고자 CT값 변화와 전산수치해석을 통해 도출된 가스하이드레이트를 포함한 유체밀도 변화를 비교하였다. 그 결과 감압에 따라 측정된 CT값 변화와 전산수치해석을 통해 파악한 유체밀도 변화가 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다.
2. 한계 가스하이드레이트포화율을 파악하고자 구축된 전산수치 모델을 활용하여 다양한 가스하이드레이트포화율(10~80%) 조건에서의 생산성 및 해리 거동을 파악하였다. 그 결과 50~60% 포화율 조건에서 가스 및 물 생산이 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 60% 포화율에서는 초기 낮은 유체 투과도의 영향으로 압력전파가 느리게 발생하여 가스하이드레이트 해리가 지연되는 것을 확인할 수 있었으며, 가스하이드레이트가 해리됨에 따라 압력전파가 회복되는 것을 파악할 수 있었다.
3. 예측된 한계 가스하이드레이트포화율에 대하여 확장된 규모에서 전산수치 해석을 수행하고자 하였으며, 이를 위해 중규모 가스하이드레이트 생산모

사 실험시스템을 반영한 전산수치 모델을 활용하여 가스하이드레이트포화율 50%와 60% 조건에서의 따른 생산량 변화를 파악하였다. 그 결과 미니고압 Cell 실험 시스템을 모사한 전산수치해석과 유사하게 60% 포화율 조건에서 가스 및 물 생산이 지연되는 것을 확인할 수 있었으며, 현장시험생산 후보지 퇴적층 조건에서 감압법 적용에 따른 한계 가스하이드레이트포화율은 50~60% 사이에 존재할 것으로 판단된다.

이 연구를 통해서 현장시험생산 후보지의 감압법 적용 시 가스 및 물 생산이 지연되는 한계 가스하이드레이트포화율을 파악할 수 있었으며, 단기간에 생산이 이루어지는 현장시험생산의 경우 파악된 한계 가스하이드레이트포화율 이하의 조건에서 효과적인 생산이 이루어질 것으로 사료된다. 향후 이 연구를 통해 동해 울릉분지 심해 가스하이드레이트 함유 퇴적층의 개발 및 생산 계획수립을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이며, 동해 울릉분지 가스하이드레이트 함유 퇴적층 대상 전역의 생산성 및 회수 효율 분석으로 확장 적용할 수 있을 것으로 사료된다.



참고문헌

- 길성민, 신호진, 이성민, 임종세, 이재형, 2017. 가스하이드레이트 생산모사 실험 시스템 내 감압법 적용에 따른 해리거동 전산분석 연구. *한국자원공학회지*, 54(3), pp.233-241.
- 길성민, 신호진, 임종세, 이재형, 2016. 가스하이드레이트 함유 단독 사질층 내 생산실험에 대한 전산 분석 연구. *2016년도 한국에너지학회 추계학술발표회*.
- 김아람, 이종원, 김형목, 2015. 일본 난카이 해구 가스하이드레이트 퇴적층으로 부터의 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.
- 서광원, 임종세, 이재형, 2010. 울릉분지 1차 시추공 자료를 이용한 가스하이드레이트 퇴적층 물성 예측. *한국지구시스템공학회지*, 47(1), pp.70-80.
- 신호진, 임종세, 김세준, 2012. 동해 울릉분지 2차 시추지역 물리검층과 코어분석 자료를 이용한 가스하이드레이트 퇴적층 공극률 및 포화율 추정, *한국지구시스템공학회지*, 49(2), pp.175-185.
- 이동건, 신호진, 임종세, 2013. 울릉분지 시추공 분석 자료를 이용한 가스하이드레이트 함유층의 3차원 공간 물성 분포 추정. *에너지공학*, 22(2), pp.120-132.
- 이성민, 2016. *중규모 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템의 해리유동 전산 분석 연구*. 석사학위논문, 부산:한국해양대학교.
- 한국지질자원연구원, 2010. *가스하이드레이트 개발생산 연구*. 대전:한국지질자원연구원
- 한국지질자원연구원, 2015. *가스하이드레이트 개발생산 연구*. 대전:한국지질자원

연구원

한국지질자원연구원, 2016. *울릉분지 가스하이드레이트 생산기술 현장 적용성 연구*. 대전:한국지질자원연구원

허대기, 2005. 가스하이드레이트 기술개발 현황. *한국지구시스템공학회지*, 42(3), pp.206-213.

허대기, 이주용, 2017. 가스하이드레이트(GH) 연구개발 현황. *한국자원공학회지*, 54(2), pp.201-214.

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.

Hong, H., 2003. *Modeling of gas production from hydrates in porous media*. M.Sc. Thesis, Calgary: University of Calgary.

Kim, J.S., Lee, R.S., Lim, J.S., Kim, S.J., and Moridis, G.J, 2014. Numerical Investigation to Assess the Gas Hydrate Production Potential of the UBGH2-6 site in the Ulleung Basin, East Sea of Korea. *Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates*, Beijing, China, July 28 - August 1.

Kleinberg, L., Brewer, G., Yesinowski, J.P., 2003. Deep sea NMR: methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability. *J. Geophysical Research*, 108(B108), pp.1-17.

Konno, Y., et al., 2017. Key Findings of the World's First Offshore Methane Hydrate Production Test off the Coast of Japan: Toward Future Commercial Production. *energy&fuels*, 31(3), pp.2607-2616.

Kumar, A., et al., 2010. Experimental determination of permeability in the presence of hydrates and its effect on the dissociation characteristics of gas hydrate in porous media. *J. of Petroleum Science and Engineering*, 70(1-2), pp.114-122.

- Lee, S.M., Kim, J.S., Shin, H.J., Lim, J.S., and Kim, S.J., 2015. Numerical Simulation for the Effect of Permeability on Gas Hydrate Dissociation Behavior during Depressurization Process in the Ulleung Basin, East Sea of Korea. *Proceedings of the 8th International Conference on Asian Marine Geology*, Jeju, Korea, October 5 - 10.
- Lee, S.R., et al., 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.
- Masuda, Y., Naganawa, S., Ando, S. and Sato, K., 1997. Numerical calculation of gas-production performance from reservoirs containing natural gas hydrate. *SPE Western Regional Meeting*, California, USA, June 25-27.
- Merey, S., 2016. Drilling of gas hydrate reservoirs. *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 35, pp.1167-1179.
- Moridis, G.J., et al., 2008a. Toward Production From Gas Hydrates: Current Status, Assessment of Resources, and Simulation-Based Evaluation of Technology and Potential. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 12(5), pp.745-771.
- Moridis, G.J., Kim, J.H., Reagan, M.T. and Kim, S.J., 2013. Feasibility of gas production from a gas hydrate accumulation at the UBGH2-6 site of the Ulleung basin in the Korean East Sea. *J. of Petroleum Science and Engineering*, 108, pp.180-210.
- Moridis, G.J., Kowalsky, M.B. and Pruess, K., 2008b. TOUGH+HYDRATE v1.0 User's Manual: A Code for the Simulation of System Behavior in

- Hydrate-Bearing Geological Media. LBNL-149E, Lawrence Berkeley National Laboratory, California, U.S.A.
- Moridis, G.J., Reagan, M.T., Kim, S.J., Seol, Y. and Zhang, K., 2009. Evaluation of the Gas Production Potential of Marine Hydrate Deposits in the Ulleung Basin of the Korean East Sea. *SPE Journal*, 14(4), pp.759-781.
- Mualem, Y., 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*, 12(3), pp.513-522.
- Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G., 1999, TOUGH2 User's Guide - Version 2.0., LBNL-43134, Lawrence Berkeley Laboratory Report, California, U.S.A.
- Shin, H.J., Lee, D.G., Lim, J.S., and Kim, S.J., 2014. Integrated 3D Reservoir Characterization for Gas Hydrate-Bearing Sediments in the Ulleung Basin, East Sea of Korea. *Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates*, Beijing, China, July 28 - August 1.
- Stone, H.L., 1970. Probability Model for Estimating Three-Phase Relative Permeability. *Journal of Petroleum Technology*, 22(2), pp.214-218.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Solids. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), pp. 892-898.