creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사 학위논문

거리기반 일반화 민감도분석 기법을 활용한 이산화탄소 지중저장 안정성 평가

Assessment of CO_2 sequestration security Using Distance-based Generalized Sensitivity Analysis Method

2018년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

강 준 희

거리기반 일반화 민감도분석 기법을 활용한 이산화탄소 지중저장 안정성 평가

Assessment of CO_2 sequestration security Using Distance-based Generalized Sensitivity Analysis Method

지도교수 최 종 근

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2018년 2월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
강 준 희

강준희의 석사 학위논문을 인준함
2017년 12월

위 원 장 박 형 동 (인)

부위원장 최 종 근 (인)

위 원 송 재 준 (인)

초 록

온실가스 감축의 일환으로 지하 지질구조에 주입된 이산화탄소는 지층 내에서 다양한 문제를 일으킬 수 있다. 또한 저장안정성, 주입능력, 총 저장용량 등을 정확하게 예측하는 것이 무엇보다 중요하다.

대수층모델은 불확실성이 있는 인자들을 내포하고 있으므로 모델 형성 및 예측을 위해서는 민감도분석을 통해 민감한 인자를 찾는 일이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 이산화탄소 소규모 주입 실증 프로젝트가 진행 중인 포항 영일만 지질모델을 바탕으로 민감도분석을 실시하였다. 누적확률분포간의 거리계산과 부트스트랩 기법을 활용한 Distance-based Generalized Sensitivity Analysis (DGSA)를 도입하여 각 인자들의 민감도를 정량화하였으며, 100개의 모델에 대해 K-Medoids 군집화기법과 라틴 하이퍼큐브 샘플링 방법을 결합하여 신뢰할 만한 분석결과를 제시하였다.

민감도분석 결과, 염수 내에 용해되어 저장된 이산화탄소 양 및 공극 내에 가스 상태로 갇혀 저장된 이산화탄소의 양은 염도, 잔류 물포화도, 잔류 가스포화도, 최소 임계 모세관압, 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값에 매우 민감하였다. 또한, 인자들 간의 상호관계를 살펴보았을 때 잔류 물포화도와 잔류 가스포화도는 서로 밀접하게 연관되어 있었다.

본 연구결과를 통해 선정된 민감한 인자들은 신뢰할 수 있는 총 저장용량 및 안정성 평가 등에 활용될 수 있다.

주요어 : 이산화탄소, 지중저장, Distance-based Generalized Sensitivity Analysis, 민감도분석, 포항 영일만

학 번 : 2016-21283

목 차

국문초록 ····· i
목차 ····· iii
List of Figures ····· v
List of Tables ····· ix

제 1 장 서론 ····· 1

제 2 장 이론적 배경 ····· 7
2.1 거리기반 일반화 민감도분석 기법 ····· 7
2.2 라틴 하이퍼큐브 샘플링 ····· 10
2.3 거리기반 모델 분류 및 군집화 ····· 12
2.4 누적확률분포를 이용한 거리 정의 및 계산 ····· 14
2.5 부트스트랩 기법을 활용한 통계검정 ····· 16
2.6 인자들 간 상호 영향도 분석 ····· 19

제 3 장 대수층모델 및 민감도분석 인자선정 ····· 21
3.1 3차원 대수층모델 및 업스케일링 ····· 21
3.2 시뮬레이션 조건 및 민감도분석인자 선정 ····· 29
3.3 라틴 하이퍼 큐브 샘플링 및 시뮬레이션 수행 ····· 38

제 4 장 민감도분석 ····· 41
4.1 주입유량 20 ton/day ····· 41

4.2 주입유량 40 ton/day ····· 52
4.3 민감도분석 결과해석 ····· 65

제 5 장 결론 ····· 75

참고문헌 ····· 78
ABSTRACT ····· 84

List of Figures

Figure 1.1 Location of sites relevant to CO_2 storage planned or under way ····· 3
Figure 1.2 CO_2 trapping mechanism ····· 3
Figure 2.1 General Process of Generalized Sensitivity Analysis ····· 8
Figure 2.2 Concept of Latin Hypercube Sampling and comparison with Monte Carlo Sampling ····· 11
Figure 2.3 Procedure of K-medoids Clustering ····· 13
Figure 2.4 Calculating distance between prior distribution and class-conditional distribution ····· 15
Figure 2.5 Procedure of Bootstrap Method ····· 18
Figure 2.6 Bootstrap distance and rejection of null-hypothesis ····· 18
Figure 3.1 Reservoir properties in the fine model ····· 22
Figure 3.2 Distribution of faults in the fine model ····· 23
Figure 3.3 Structure of layers in the fine model ····· 23
Figure 3.4 All-intersecting cells sampling method ····· 25
Figure 3.5 Reservoir properties in the upscaled model ····· 26
Figure 3.6 Porosity and permeability histogram and cumulative density function of fine model and upscaled model ····· 27
Figure 3.7 Simulation results of fine model and upscaled model ····· 28
Figure 3.8 Probability density function of residual water saturation ····· 37
Figure 3.9 Probability density function of CO_2 end-point relative permeability ····· 37
Figure 3.10 Histogram of parameter alpha sampled by LHS ····· 39
Figure 3.11 Histogram of parameter S_{rw} sampled by LHS ····· 39

Figure 3.12 100 relative permeability curves generated by LHS ····· 40
Figure 3.13 100 capillary pressure curves generated by LHS ····· 40
Figure 4.1 Clustering result of 100 models by FWCD ····· 42
Figure 4.2 Parameter sensitivity for FWCD by cluster ····· 42
Figure 4.3 Standardized sensitivity for FWCD ····· 43
Figure 4.4 Salinity CDF by cluster and prior distribution for FWCD ····· 45
Figure 4.5 Krgmax CDF by cluster and prior distribution for FWCD ····· 45
Figure 4.6 Bubble plot of parameters interaction for FWCD ····· 46
Figure 4.7 Clustering results of 100 models by FGCDI ····· 47
Figure 4.8 Parameter sensitivity for FGCDI by cluster ····· 47
Figure 4.9 Entry Pc CDF by cluster and prior distribution for FGCDI ····· 50
Figure 4.10 S_{rw} CDF by cluster and prior distribution for FGCDI ···· 50
Figure 4.11 Bubble plot of parameters interaction for FGCDI ····· 51
Figure 4.12 Clustering result of 100 models by FWCD ····· 53
Figure 4.13 Parameter sensitivity for FWCD by cluster ····· 53
Figure 4.14 Standardized sensitivity for FWCD ····· 54
Figure 4.15 S_{rw} CDF by cluster and prior distribution for FWCD ····· 56
Figure 4.16 S_{rg} CDF by cluster and prior distribution for FWCD ··· 56
Figure 4.17 Bubble plot of parameters interaction for FWCD ····· 57
Figure 4.18 Clustering result of 100 models by FGCDI ····· 58
Figure 4.19 Parameter sensitivity for FGCDI by cluster ····· 58
Figure 4.20 Standardized sensitivity for FGCDI ····· 59
Figure 4.21 Krgmax CDF by cluster and prior distribution for FGCDI ····· 60

Figure 4.22 Entry Pc CDF by cluster and prior distribution for FGCDI ····· 60
Figure 4.23 Clustering result of 100 models by WBHP ····· 62
Figure 4.24 Parameter sensitivity for WBHP by cluster ····· 62
Figure 4.25 Standardized sensitivity for WBHP ····· 63
Figure 4.26 Salinity CDF by cluster and prior distribution for WBHP ····· 64
Figure 4.27 Krgmax CDF by cluster and prior distribution for WBHP ····· 64
Figure 4.28 Salting out effect ····· 66
Figure 4.29 Gas saturation distribution for different S_{rw} ····· 68
Figure 4.30 Gas saturation distribution for different S_{rg} ····· 69
Figure 4.31 Gas saturation distribution for different Entry Pc ····· 71
Figure 4.32 Bubble plot for parameter interactions of dissolved fraction of CO_2 in water ····· 73
Figure 4.33 S_{rg} CDF by cluster and prior distribution of S_{rg} ····· 74
Figure 4.34 Conditional Effects of Srw for S_{rg} ····· 74

List of Tables

Table 3.1 Relative error of model responses ····· 28
Table 3.2 Aquifer model description and simulation parameters ····· 30
Table 3.3 Distribution of aquifer parameters ····· 36
Table 4.1 Standardized sensitivity for FWCD ····· 43
Table 4.2 Standardized sensitivity for FGCDI ····· 48
Table 4.3 Standardized sensitivity for FWCD ····· 54
Table 4.4 Standardized sensitivity for FGCDI ····· 59
Table 4.5 Standardized sensitivity for WBHP ····· 63

제 1 장 서론

이산화탄소 지중저장(carbon capture and storage, CCS)은 발전소, 산업, 운송수단 등에 의해 발생한 이산화탄소를 포집하여 지하의 지질학적 구조에 주입함으로써 대기 중의 이산화탄소를 직접적으로 저감하는 기술이다(Blunt, 2010). 최근 온실가스 및 기후변화에 대한 논의가 활발하게 진행됨에 따라, CCS가 온실가스를 직접적으로 감축할 수 있는 기술로 인정받기 시작하였고 Fig. 1.1과 같이 현재 세계의 여러 지역에서 CCS 프로젝트가 진행 중에 있다.

포집된 이산화탄소는 석탄층, 염수 대수층, 고갈된 오일 및 가스 저류층 등 다양한 지하 지질학적 구조에 주입될 수 있다. 그 중에서도 지하의 염수층은 이산화탄소 지중저장을 위해 적합한 구조이다. 그 이유는 염수층은 석탄층, 오일 및 가스 저류층에 비해 편재성이 적어 다양한 지역에 분포하며, 다른 지질구조에 비해 저장용량이 크기 때문이다.

이산화탄소가 염수층에 주입되는 경우 주입된 이산화탄소는 Fig. 1.2와 같이 크게 네 가지 형태로 저장이 이루어진다. 첫 번째로, 구조적 트랩은 초임계상태의 이산화탄소가 부력에 의해 대수층 내에서 수직유동을 할 때, 불투수성 지층이 이산화탄소의 상승유동을 억제하고 구조적으로 가둠으로서 이루어지는 저장형태를 일컫는다. 두 번째로, 용해 트랩은 이산화탄소가 염수층 내의 염수에 용해되어 저장되는 형태를 말한다. 주입된 이산화탄소가 염수 내에 용해 되면 염수의 밀도가 상승하여 대수층 내 하부로 유동하여 저장의 안정성을 보장할 수 있다.

세 번째로, 이산화탄소가 대수층 내에서 이동할 때, 기존에 공극에 갇혀 있던 염수를 밀어내며 이동하지만, 이산화탄소 플룸의 특정부분에서는 물이 다시 공극 내부로 침투하여 기존의 이산화탄소를 공극 내에 끊어진 형태로 영구적으로 가두어버리기도 하는데 이러한 저장기작을 잔류

트랩이라고 한다. 마지막으로, 용해 트랩을 통해 저장된 이산화탄소는 염수의 산성도를 변화시킨다. 약산성으로 변한 염수는 오랜 시간에 걸쳐 주위 암석과의 화학적 반응을 통해 탄산염을 형성하는데 이와 같이 화학적 반응을 통해 저장되는 형태를 미네랄 트랩이라고 한다.

염수층에 주입된 이산화탄소는 지층 내에서 다양한 문제를 발생시키기도 한다. 먼저, 초임계상태의 이산화탄소는 점성도가 염수 평균의 약 1/10에 가까워 상대적으로 유동이 더 용이할 뿐만 아니라, 부력에 의해 덮개암, 불투수층 근처로 상승하기 때문에 덮개암에 균열이 있는 경우나 혹은 인접 시추공이 있는 경우 이산화탄소의 누출이 발생할 수 있다. 누출경로가 인근 지하수층과 연결 되어 있는 경우에는 동, 식물뿐만 아니라 사람에게도 큰 피해를 입힐 수도 있다. 두 번째로, 주입된 이산화탄소로 인해 대수층 내 압력이 증가함에 따라 단층을 활성화하거나 미소지진과 같은 문제를 발생시킬 수 있다. 또한, 이 과정에서 형성된 미소 균열은 다시 이산화탄소의 누출 경로가 되기도 한다.

따라서, 실제 대상지역에서의 안전한 이산화탄소 지중저장을 수행하기 위해서는 주입 후 이산화탄소 거동을 중점적으로 모니터링해야 한다. 이를 통해 향후 주입기간, 주입유량, 주입시점 등의 계획을 수립할 수 있으며 궁극적으로는 안전한 저장형태를 보장함과 동시에 총 저장용량을 계산할 수 있다. 이와 같은 작업은 보통 저류층 시뮬레이션을 통해 이루어진다. 특히, 이산화탄소 지중저장의 경우 주입 후 미래 거동을 예측함에 있어서 오랜 시간이 소요되기 때문에 시뮬레이션을 통해서 저장용량 평가, 저장안정성 평가, 주입정 디자인과 같은 작업이 사전에 효율적으로 이루어진다.

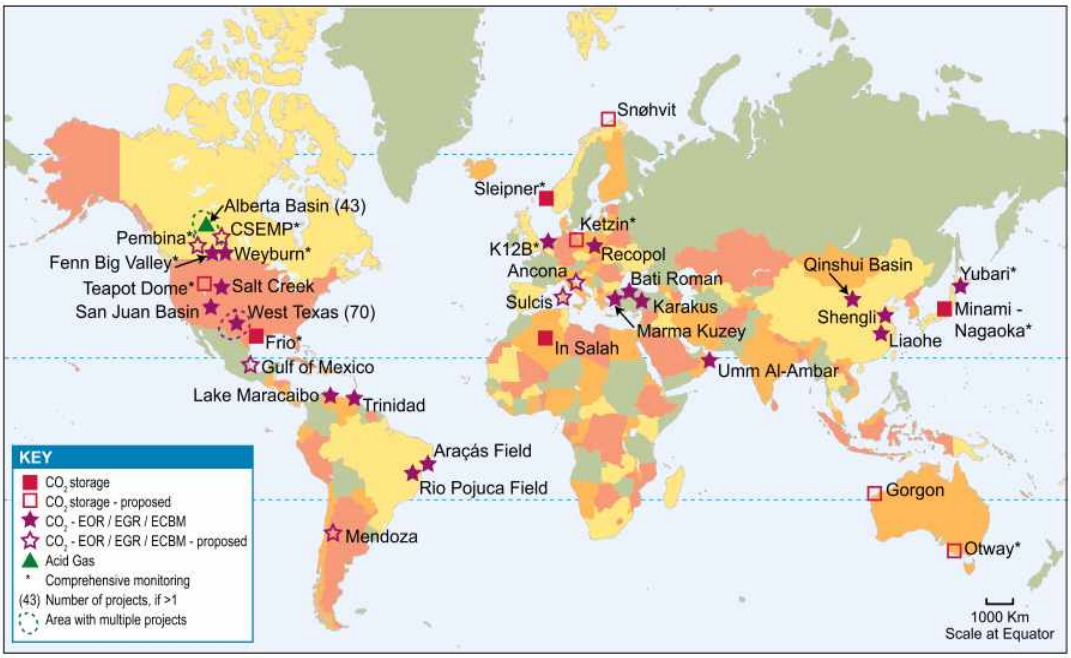


Figure 1.1 Location of sites relevant to CO_2 storage planned or underway (IPCC, 2011)

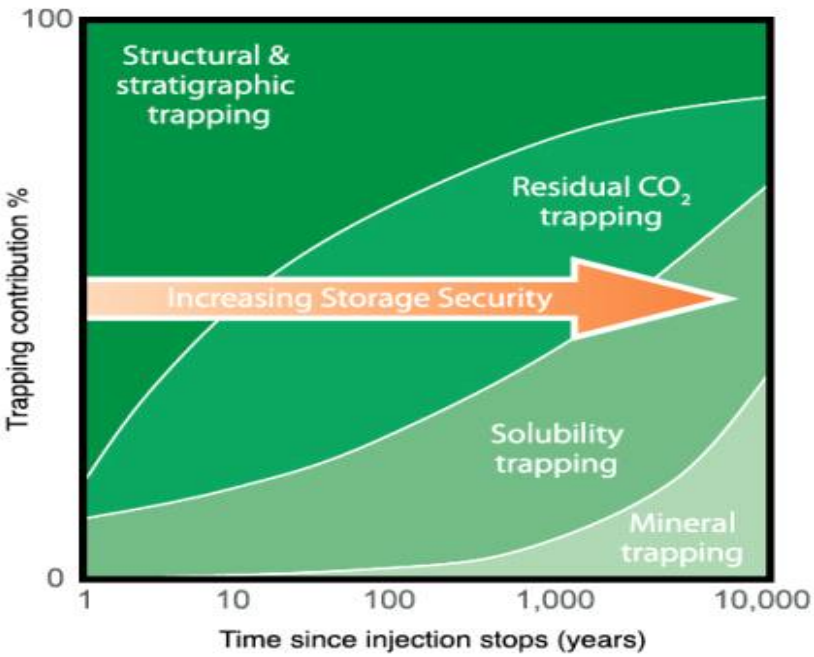


Figure 1.2 CO_2 trapping mechanism (IPCC, 2005)

저류층 모델을 구현하여 시뮬레이션을 통해 주입된 이산화탄소의 거동을 예측함에 있어 높은 불확실성을 수반한다. 시추공탐사, 코어분석, 탄성파탐사 등을 통해 실제 대수층의 지질학적 정보를 파악할 수 있으나 이는 비용과 시간상으로 제한적일 수밖에 없으며 특히, 시추공 탐사의 경우 대수층의 크기에 비해 얻을 수 있는 자료의 범위가 작고 해상도가 떨어진다. 그러므로 제한적인 정보를 통해 구축된 시뮬레이션 모델 역시 불확실성을 가질 수밖에 없다. 뿐만 아니라, 대수층의 특성을 결정짓는 여러 인자는 서로 반드시 독립적이지 않으며 모델의 반응과 선형적인 관계에 있지 않은 경우가 많기 때문에 시뮬레이션 결과가 실제 현상을 잘 모사하지 못할 확률이 크다.

불확실성을 가지는 인자들로 인해 신뢰할만한 예측을 수행할 수 없는 상황에서 무엇보다 중요한 것은 시뮬레이션 결과와 인자들 간의 상관관계, 인자들 간의 상호 상관관계와 민감도를 파악하는 것이다. 앞서 언급했듯이, 대수층 시뮬레이션의 결과와 인자들은 서로 비선형적인 관계에 있는 경우가 많으며 인자들 간의 관계 역시도 독립적이지 않은 경우가 많다. 이러한 상황에서 저류층 공학자는 민감도분석을 통해 민감한 인자와 그렇지 않은 인자를 분류함으로써 결과적으로는 모델의 불확실성을 개선할 수 있다. 구체적으로, 민감한 인자에 대해서는 추가 동적자료를 통한 히스토리 매칭, 탐사 등의 기법을 도입하여 그 인자의 불확실성을 낮춤으로서 신뢰할만한 저류층 모델을 얻을 수 있다.

이산화탄소 지중저장에 대한 관심이 높아지고 실제 CCS 프로젝트가 많이 진행됨에 따라 지중저장 시뮬레이션 및 민감도분석에 관한 연구가 다수 수행되었다. Mo와 Akervoll(2005)은 압력, 온도, 유체투과율, 수직수평유체투과율 비, 최대 잔류 가스포화도, 잔류 물포화도 등과 같은 대수층 인자들을 인공모델에 적용하여 용해 트랩, 잔류 트랩, 구조적 트랩 각각의 저장형태에 따른 이산화탄소 양에 대한 민감도분석을 실시하였다. 또한, 모세관압의 크기에 따라 저장 형태의 변화를 조사하였다.

Zhao 등(2010)은 인공적으로 만들어진 모델을 사용하여 염도, 수직수

평유체투과율 비, 잔류 물포화도 등에 대한 민감도분석을 수행하였다. 하지만 모델의 반응으로 용해 트랩 형태에 의해 물에 녹은 이산화탄소의 양만을 분석하여 다른 저장 형태는 고려하지 않았다.

Pickup 등(2011)은 영국 북해 지역의 CCS 프로젝트 대상지역에 대해 민감도분석을 실시하였다. 그들은 모델을 크게 단순한 격자모델과, 코어분석, 시추공자료 등의 방법을 통해 정보를 획득하여 이를 업데이트한 복잡한 지질학적 모델 두 가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시나리오 별로 주입유량과 주입정의 개수를 다르게 하였다. 그러나 시뮬레이션의 결과값을 주입정의 압력만으로 한정하여 모델 내 총 저장용량이나 저장형태에 따른 양에 대한 민감도를 분석하지 못하였다는 한계가 있다.

Sarkarfarshi 등(2014)은 캐나다의 Nisku 대수층을 대상으로 이산화탄소 플룸의 반지름과 플룸이 최대로 미치는 범위를 모델의 반응으로 설정하여 이산화탄소의 거동양상에 영향을 미치는 민감도분석을 수행하였다. Nisku 대수층의 상대유체투과율 코어실험자료를 활용하여 상대유체투과율 인자에 대해 중점적으로 불확실성을 부여하고 이를 분석 대상 인자로 삼았다. 또한, 선정한 모델의 두 반응에 대한 인자들의 민감도를 시간에 대하여 각각 분석함으로써 기존의 연구와 차별화하였다. 하지만, 민감한 인자들로 분류된 원인에 대해서는 명확히 규명하지 못하였다는 한계가 있다. 또한, 시뮬레이션 결과값으로 플룸의 반지름과 범위를 설정하였기 때문에 플룸이 이동하면서 어떠한 저장형태로 저장되었는지에 대한 정량적인 분석을 수행하지 못하였다.

Choi 등(2015)은 소규모 이산화탄소 주입 실증 프로젝트 부지인 포항 영일만 해상분지를 바탕으로 잔류 가스포화도에 따른 이산화탄소 지중저장 시뮬레이션을 수행하였다. 잔류 가스포화도에 따른 이산화탄소의 염수 내 용해량과의 상관관계를 중점적으로 밝히는데 초점을 두었다.

위의 연구들은 대수층인자들이 지중저장된 이산화탄소의 거동에 어떻게 영향을 미치며 저장형태가 시간 및 대수층 내 공간적 성질에 따라 어

떻게 변화하는지를 밝힘으로써 이산화탄소 지중저장 시뮬레이션에 대한 이해를 높였다. 하지만 기존 연구들은 시뮬레이션 및 민감도분석의 편의를 위해 실제 저장 부지의 특성을 반영한 모델이 아닌 비교적으로 단순한 인공모델을 주로 사용하였다. 따라서 실제 현장 모델의 특징을 반영하는 인자에 대해서 민감도분석을 수행하지 못했으며 모델에 따른 민감도 차이의 유무 역시 밝히지 못하였다. 또한, 다른 인자들을 고정하고 하나의 인자를 바꾸어 가는 민감도분석 기법을 주로 활용하였기 때문에, 모델의 반응과 설정한 인자의 종류가 다양하지 못하다는 한계를 지닌다.

본 연구에서는 이산화탄소 주입 실증 프로젝트 부지인 포항 영일만 해상분지 지질모델을 바탕으로 Distance-based Generalized Sensitivity Analysis (DGSA) 방법을 사용하여 민감도를 분석한다. DGSA는 다른 인자들을 고정한 채 하나의 인자를 바꾸어 가는 전통적인 민감도분석기법과 달리 분석하고자 하는 인자들을 하나의 집합으로서 다루기 때문에 인자들 간의 상호관계를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 추계학적인 기법을 사용하기 때문에 인자들의 분포나 성질에 있어서 가정이나 부가적인 제약조건을 부여하지 않아도 된다. 궁극적으로, 본 연구는 민감도분석을 통해 포항 영일만 대수층 인자들의 민감도를 조사하며 시뮬레이션 결과를 바탕으로 저장용량, 이산화탄소 거동 예측 및 모니터링 계획을 사전에 수립하기 위한 정보를 제공하는데 그 의의가 있다.

본 논문은 크게 5장으로 구성된다. 1장에서는 기존연구들의 현황을 파악하고 이산화탄소 지중저장의 개요 및 본 연구의 필요성에 대해 제시한다. 2장에서는 본 연구의 이론적 배경이 되는 DGSA, 클러스터링 기법, 부트스트랩 Method 에 대해 설명한다. 3장에서는 본 연구에 사용된 모델의 선정방법, 모델 특징, 시뮬레이션 조건을 포함하여 민감도분석을 수행하기 위해 선정한 인자들에 대해 중점적으로 설명한다. 4장에서는 분석 결과들을 보여주고 이를 해석한다. 마지막으로 5장에서는 연구결과들을 정리하고 연구의 결론을 언급한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 거리기반 일반화 민감도 분석 기법

Generalized Sensitivity Analysis (GSA)는 Spear와 Hornberger (1980)에 의해 처음 제안되었다. GSA의 가장 근본적인 원리는 모델들을 여러 개의 군으로 분류하는 것이다. Spear와 Hornberger (1980)는 그들의 연구에서 악성 조류(alga)의 성장에 영향을 끼치는 인자들을 분석하고자 하였다. 그들은 조류의 성장정도에 따라 B와 B'의 두 개의 군으로 분류하여 분석한 인자의 분포를 각 군 별로 조사하였다 이 경우, 영향을 미치는 인자의 누적확률분포는 군 별로 다르게 나타나는 반면, 그렇지 않은 인자의 누적확률분포는 군 별로 비슷한 양상을 보였다.

이와 같이, 모델의 반응을 몇 개의 군으로 분류한 뒤 각 인자에 따른 군 별 누적확률분포의 형태를 비교함으로써 모델의 반응에 민감한 인자와 그렇지 않은 인자를 도출하였다. GSA의 전체적인 과정의 예시는 Fig. 2.1과 같이 요약할 수 있다. 조류의 성장에 관여할 수 있다고 판단되는 10개의 인자(p)를 선정하고 500개의 조류(n)에 대해 샘플링을 수행한다. 이후 성장정도에 따라 조류를 2개의 군(B, B')으로 분류한 뒤 각 인자들에 대한 누적확률분포를 통해 각 인자의 영향력을 평가한다.

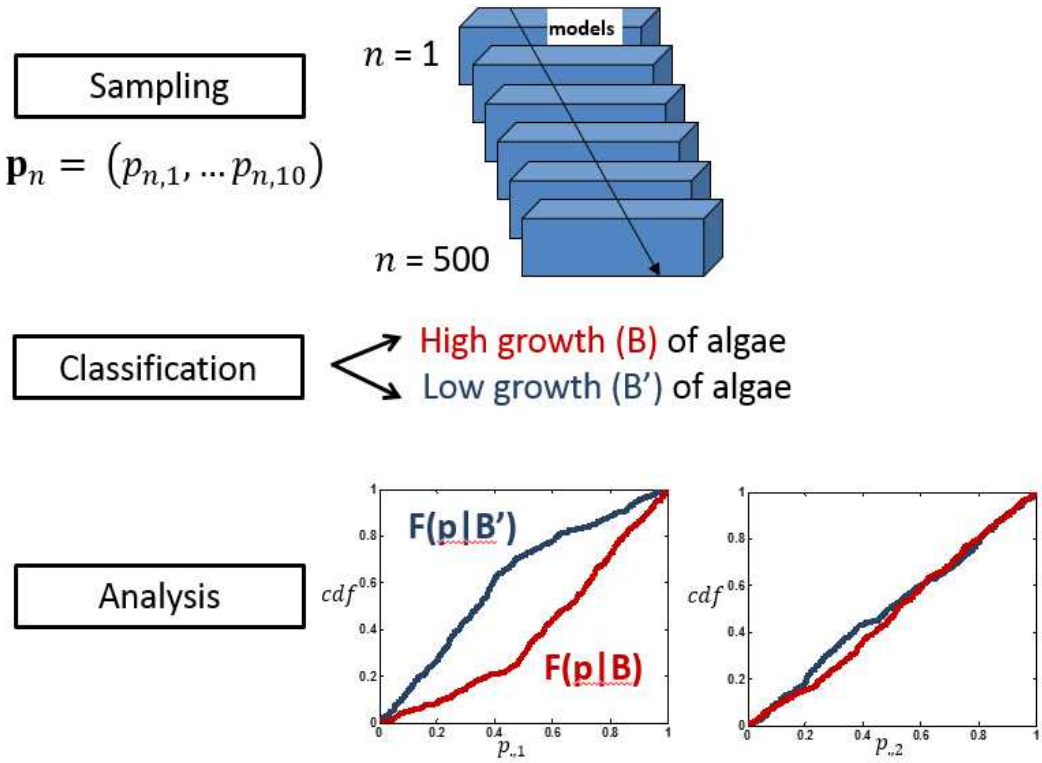


Figure 2.1 General Process of Generalized Sensitivity Analysis

DGSA는 Spear와 Hornberger (1980)이 제안한 GSA 방법론을 확장 및 발전시킨 형태로서 Fenwick (2014)이 처음 제안하였다. DGSA는 시뮬레이터와 연동하여 민감도를 분석할 수 있으며 GSA와 비교할 때, 크게 네 가지 측면에서의 발전이 이루어졌다.

첫 번째로, K-medoids clustering과 같은 거리기반 군집화기법을 통해 두 개 이상의 군을 형성할 수 있다. 두 번째로 L1-norm 거리를 도입하여 각 인자의 군 별 누적확률분포의 비유사성을 수학적으로 분석할 수 있다. 세 번째로, 통계 검정 기법중 하나인 부트스트랩 기법을 통해 판단의 신뢰성을 확보할 수 있다. 마지막으로, 모델의 반응과 인자 간의 직접적인 상관관계뿐만 아니라, 인자들 간의 상호작용에 의한 모델의 반응변화도 파악할 수 있다.

DGSA의 장점은 크게 세 가지로 정리할 수 있다. 첫 번째로, 모델의 반응은 군집화를 위해서만 사용되기 때문에 프록시 모델을 사용하여 시뮬레이션의 시간을 단축시킬 수 있다. 두 번째로, 개별 인자에 대한 모델의 반응을 순차적으로 살피는 것이 아니라 분석하고자 하는 인자들을 하나의 집합으로서 다루기 때문에 인자들 간의 상호관계를 파악할 수 있으며 이를 통해 비선형적인 관계에 있는 모델의 반응과도 민감도를 분석할 수 있다. 마지막으로, 추계학적인 기법을 사용하기 때문에 인자들의 분포나 성질에 있어서 가정이나 부가적인 제약조건을 부여하지 않아도 된다.

2.2 라틴 하이퍼큐브 샘플링

DGSA를 통해 모델의 민감도분석을 수행하기 위해서 모델의 인자들을 사전에 선정하는 것이 필요하다. 이 때, 인자들은 연속적인 값을 갖는 인자일 수도 있고 이산적인 인자일 수도 있다.

$$P_i = [P_{i,1}, P_{i,2}, P_{i,3} \cdots P_{i,n}], \quad i = 1, L \tag{2.1}$$

P는 모델의 반응을 예측하기 위해 선정된 인자들의 집합을 의미하며 n은 i번 째 P 집합 내의 원소의 개수, 즉 인자의 개수이다. 이러한 인자들의 집합은 모델의 개수에 해당하는 L개만큼 존재한다.

코어분석자료, 실험자료, 문헌자료 등을 통해 n개의 인자에 대하여 일차적인 분포가 형성되면 이로부터 인자를 편향 없이 L개만큼 추출하는 것이 매우 중요하다. 무작위 추출법의 경우 획득한 분포로부터 인자를 추출할 때, 이전에 추출되었던 지점을 고려하지 않은 상태로 새로운 추출 지점이 생성되기 때문에 추출횟수가 충분히 확보되지 않은 경우, 자료의 편향이 발생하고 이는 편향된 시뮬레이션 결과를 낳을 수 있다. 한편, 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Mckay, 1979)의 경우 분포를 동일한 확률구간으로 분할하여 각 구간에서 인자가 추출되기 때문에 무작위 추출법에 비해 상대적으로 일관성 있고 전반적으로 고른 분포의 표본을 추출할 수 있다.

$$P_{kj}, \quad j = 1, N, \; k = 1, n \tag{2.2}$$

식 (2.2) 와 같이 총 L개의 인자 집합에 대하여 k번 째 인자는 해당 인자의 분포를 N개의 구간으로 나누었을 때, 각 구간에서 추출되어 크기 L만큼의 새로운 표본분포를 띤다. Fig. 2.2는 라틴 하이퍼큐브 샘플링의 방법의 개념과 무작위 추출법과의 차이를 보여준다.

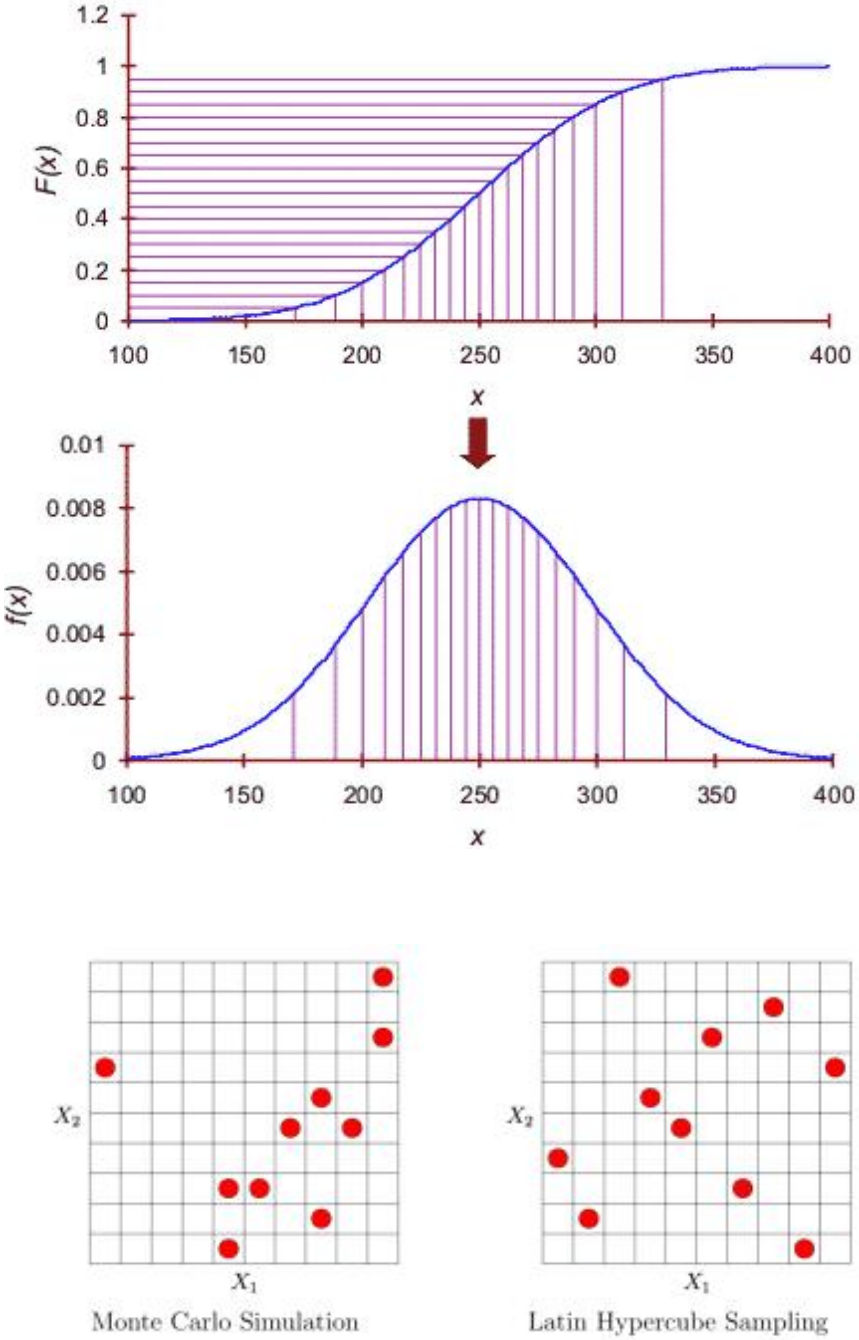


Figure 2.2 Concept of Latin Hypercube Sampling and comparison with Monte Carlo Sampling (Schultze et al., 2017)

2.3 거리기반 모델 분류 및 군집화

DGSA는 시뮬레이션의 결과로 도출된 모델의 반응만을 이용해 모델의 군집화를 수행한다.

$$m_i^{(\ell)}, \quad \ell = 1, L \tag{2.3}$$

$$r_i^{(\ell)}, \quad \ell = 1, L \tag{2.4}$$

r은 모델 m을 통해 얻어진 모델의 반응을 의미한다. 한편, ℓ은 ℓ번 째 모델, n은 i번 째 P 집합 내의 원소의 개수, 즉 인자의 개수를 의미한다. L개의 인자집합이 반영되어 구성된 L개의 모델 m의 시뮬레이션 결과를 군집화 함에 있어서 중요한 것은 r간의 비유사성을 정의하는 방법과 정의한 비유사성의 척도를 기반으로 어떤 군집화기법을 적용할 것인가에 있다.

본 연구에서는 두 점 사이의 거리를 계산하기 위해 일반적으로 사용되는 유클리드 거리기법을 적용하여 r의 비유사성을 정의하였다. 또한, 유클리드 거리를 바탕으로 K-medoids 군집화기법을 사용하였다. K-medoids 군집화기법은 실제 n개의 객체 중에서 하나를 선정하여 이 객체를 중심으로 나머지 객체들을 군집에 할당하는 기법으로 Fig. 2.3은 그 과정을 보여준다. 먼저, 전체 객체 중 군집의 개수만큼 대표객체들을 임의로 선정한다. 대표객체들을 바탕으로 나머지 객체들을 유사성이 높은 군집에 배정한다. 이후, 현재 대표객체가 아닌 다른 객체들을 대표객체로 임의로 선정하여 앞선 과정을 반복한다. 이 때, 거리의 총합이 이전 과정에서 얻은 거리의 총합보다 작다면 대표객체를 교체하고 다시 나머지 객체들을 군집에 배정한다. 거리의 총 합의 변화가 없을 때까지 위의 과정을 반복한다.

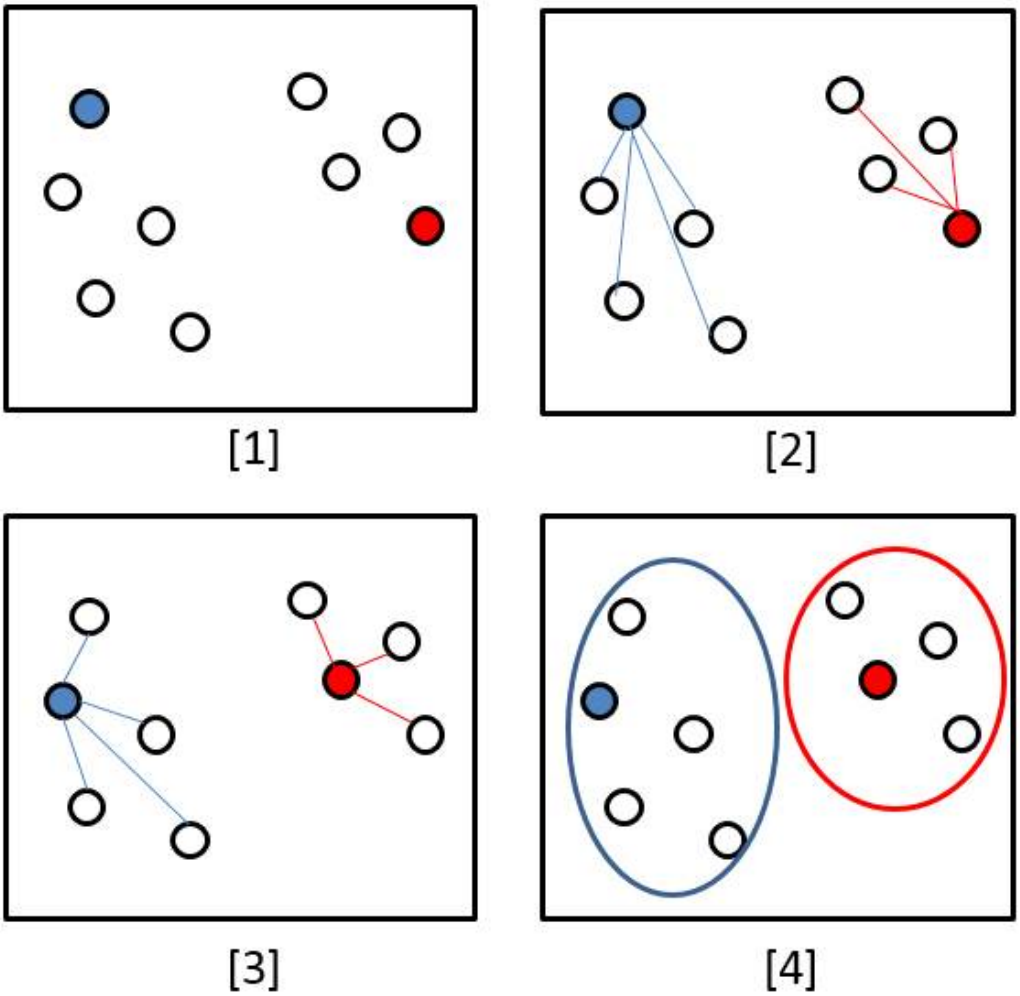


Figure 2.3 Procedure of K-medoids clustering

$$c = [c_1, c_2, \cdots c_K] \tag{2.5}$$

$$n_c = [nc_1, nc_2, \cdots nc_K] \tag{2.6}$$

식 (2.5), (2.6)의 c와 n_c는 각각 군집과 군집 내 모델의 개수를 의미하며 군집화과정을 통해 위와 같이 총 K개의 군집이 형성된다. 이 때, 모델의 반응 간 비유사성을 구별할 수 있는 적절한 K값과 n_c의 선정이 필요하며 이를 위해 Davies-Bouldin index (Davies and Bouldin, 1979), Silhouette index (Rousseeuw, 1986) 등이 제안되었다.

2.4 누적확률분포를 이용한 거리 정의 및 계산

모델의 반응 r을 K개의 군집으로 분류한 뒤, 분석하고자 하는 개별 인자에 대한 누적확률분포를 작성할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 누적확률분포의 개념은 매끄러운 곡선형태가 아닌 Stair-step function의 형태이며 이는 분포 간 계산과정을 용이하게 수행하기 위함이다.

2.1에서 언급한 것과 같이, 각 인자에 대한 K개 군집의 누적확률분포가 군집 간에 상이하며, 이와 동시에 모든 모델에 대한 각 인자의 사전분포와 다른 양상을 보인다면 이 인자는 모델의 반응과 군집화에 민감한 인자로 판별된다. 반대로, K개 군집의 누적확률분포가 서로 비슷한 형태를 띠고, 사전분포와 유사하다면 이 인자는 민감하지 않은 인자로 판별된다.

$$\hat{F}(p_i),\ \hat{F}(p_i|c_k)\ \ \forall i,k \tag{2.7}$$

$$\hat{d}_{k,i} = f_{\triangle cdf}(\hat{F}(p_i),\ \hat{F}(p_i|c_k))\ \ k = 1, \cdots K \tag{2.8}$$

식 (2.7)의 $F(p_i)$는 i번 째 인자에 대한 모델의 사전분포, 즉 사전누적확률분포를 의미하며 $F(pi|c_k)$는 k번 째 군집의 i번 째 인자에 대한 누적확률분포를 의미한다. $d_{k,i}$는 $F(p_i)$와 $F(pi|c_k)$ 사이의 비유사성을 수학

적으로 판단하기 위한 거리로 정의되며 본 연구에서는 식 (2.9)와 같은 L1-norm 거리를 사용한다. Figure 2.4는 X인자에 대한 사전 누적확률분포와 군집 C의 X인자에 대한 누적확률분포 간의 거리계산방법을 보여준다.

$$X = (x_1, x_2, \cdots x_n), Y = (y_1, y_2, \cdots y_n) \tag{2.9}$$
$$d_{L1}(X, Y) = \sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i|$$

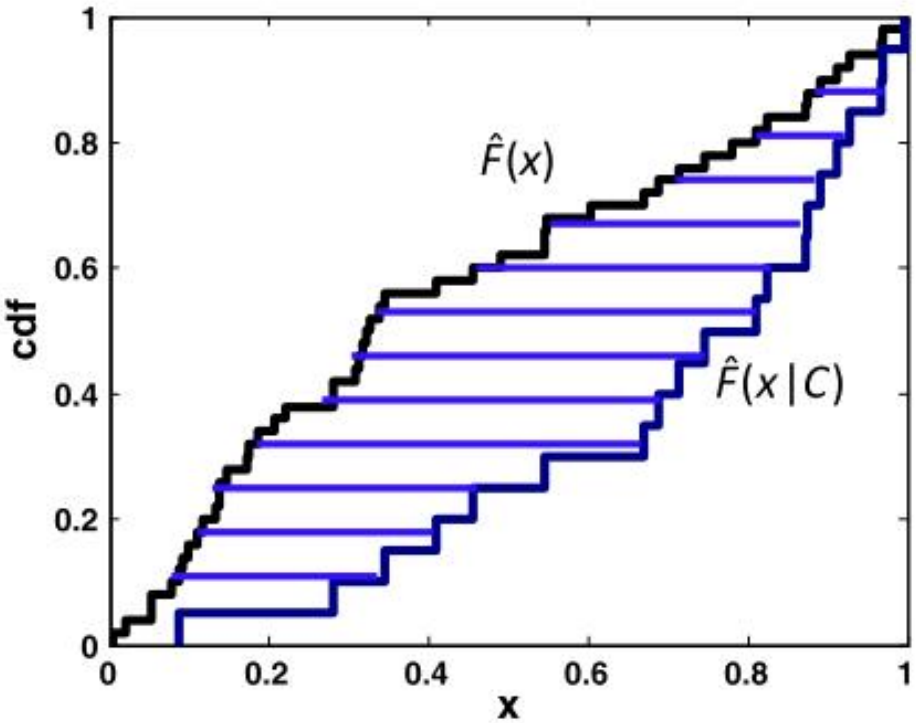


Figure 2.4 Calculating distance between prior distribution and class-conditional distribution (Fenwick, 2014)

2.5 부트스트랩 기법을 활용한 통계 검정

모든 i, k에 대하여 $F(p_i)$와 $F(p_i|c_k)$ 사이의 $d_{k,i}$가 계산되면 이를 바탕으로 부트스트랩 기법이라는 통계적인 기법을 적용하여 최종적으로 p_i가 민감한 인자인지 판별한다. 부트스트랩 기법은 실제 결과를 바탕으로 가상의 추출과정을 수행하고 그 결과의 정확성을 평가하는 방법이다. 저류층 시뮬레이션을 수행함에 있어 방대한 양의 모델을 구축하는 것은 시간과 비용이 매우 많이 소요 된다. 하지만, 부트스트랩 기법은 상대적으로 적은 수의 모델을 사용하여도 신뢰할 수 있는 통계검정을 할 수 있다는 장점을 지닌다. 통계 검정을 실시하기 위해 가장 먼저 아래와 같은 귀무가설을 세운다.

$H_0 =$ i번 째 인자에 대하여 군집 간 누적확률 분포의 차이가 없다. (2.10)

일련의 통계검정과정을 통해 위의 귀무가설을 수용하면, 인자 p_i에 대하여 각 군집에서 p_i에 따른 모델의 반응 차이가 없으므로 해당 인자는 민감하지 않은 인자로 분류된다. 반대로, 귀무가설을 기각하면 해당 인자는 모델의 군집에 따라 그 분포가 다르고 모델의 반응에 영향을 미친다는 대립가설을 채택하게 된다.

$$p_{i,k}^{(b)} = [p_{i,1}^{(b)}, p_{i,2}^{(b)}, \cdots p_{i,n\,c_k}^{(b)}] \tag{2.11}$$

귀무가설을 세운 뒤, k번 째 군집의 i번 째 인자에 대하여, i번 째 인자의 사전분포로부터 n_{ck} 즉, k번 째 군집의 모델 개수에 해당하는 크기만큼 무작위 복원추출을 시행한다. $p^{(b)}_{i,k}$는 사전분포로부터 추출된 i번째 인자의 집합을 의미하며 사전에 정해놓은 부트스트랩 수치만큼 반복하여 표본을 생성하게 된다. 본 연구에서는 2000번 복원추출 하여 개별 군집과 크기가 같은 부트스트랩 표본을 각각 2000개씩 생성하였다.

$$\hat{\hat{d}}_{k,i} = f_{\Delta cdf}(\hat{F}(p_i), \hat{F}(p_{i,k}^{(b)})) \tag{2.12}$$

식 (2.12) 와 같이 k번 째 군집의 i번 째 인자에 대하여 부트스트랩 복원추출을 통해 형성된 2000개의 표본들과 i번 째 인자의 사전분포 사이의 거리를 계산할 수 있다. 식 (2.8) 에서와 마찬가지로 L1-norm 거리계산을 통해 2000개의 거리를 최종적으로 획득한다.

$$\text{if } \exists k \text{ for which } \hat{d}_{k,i} \geq \hat{\hat{d}}_{k,i}^{(q)} \text{ then } H_0 \text{ is rejected} \tag{2.13}$$

부트스트랩 표본분포와 사전분포 사이의 계산된 거리를 오름차순으로 정렬하여 누적확률분포를 작성하였을 때, 통계검정을 위해 선정한 유의수준의 확률에 맞는 부트스트랩 표본거리를 찾을 수 있다. 예를 들어, 유의수준을 5%로 선정했다면 누적확률이 0.95에 해당하는 거리가 최종적으로 민감도 유무의 판단을 내릴 수 있는 근거이다. 즉, 식 (2.13)과 같이 식 (2.8)에서 구한 거리가 유의수준에 해당하는 부트스트랩 표본거리 보다 크거나 같은 군집이 하나라도 존재한다면 i번 째 인자가 모델의 반응에 영향을 끼치지 않는다는 귀무가설은 기각되며, 그에 반대되는 대립가설이 채택되어 모델에 반응에 민감한 인자로 판단한다. Fig. 2.5와 Fig. 2.6은 위의 과정을 요약하여 보여준다.

$$s(p_i) = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} \hat{d}_{k,i}^{S} \text{ with } \hat{d}_{k,i}^{S} = \frac{\hat{d}_{k,i}}{\hat{\hat{d}}_{k,i}^{(q)}} \tag{2.14}$$

부트스트랩 결과를 이용해 모델의 반응 r에 대한 i번 째 인자 p_i의 표준화된 민감도는 식 (2.14)와 같이 정의한다. 이 때 k는 군집의 개수이다.

Set null-hypothesis

Sample randomly n_{ck} parameter values from its prior distribution

Compute the distance between both distributions

Repeat procedure 2000 times and pick the 95th percentile

Compare $d_{k,i}$ with $d_{k,i}^{b(95)}$

Figure 2.5 Procedure of Bootstrap method

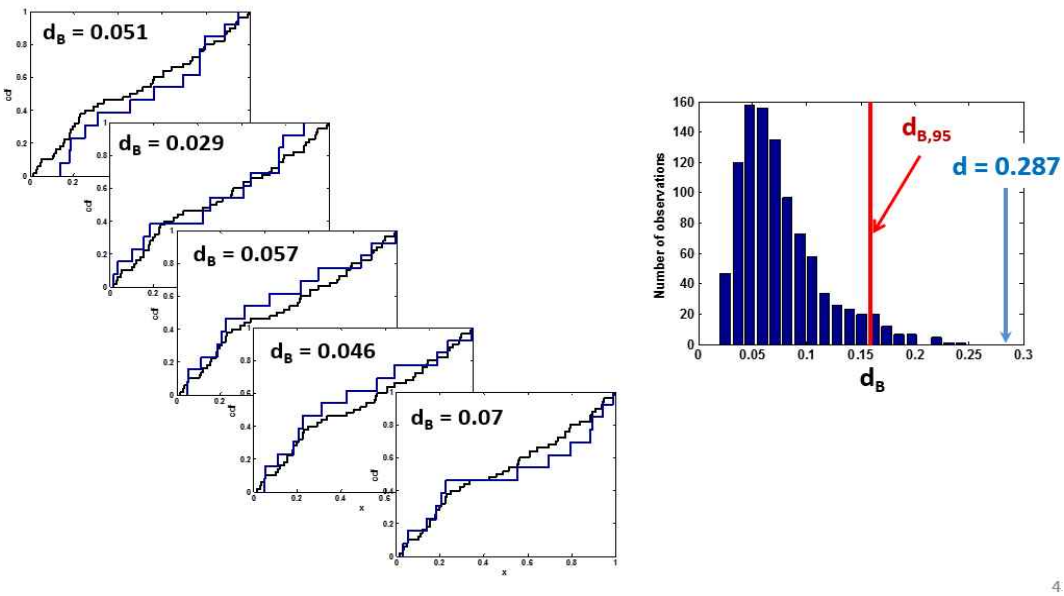


Figure 2.6 Bootstrap distance and rejection of null-hypothesis (Fenwick, 2013)

2.6 인자들 간 상호 영향도 분석

저류층 모델링 과정에서 사용되는 다양한 인자는 모델의 반응과 상호 복잡하게 얽혀 있다. 따라서 단일 인자 자체는 모델의 반응에 영향을 주지 못하지만 두 개 혹은 세 개 이상의 인자의 조합이 모델의 반응에 민감한 경우도 존재한다. 이는 다양한 인자들과 모델 사이의 관계가 대부분 비선형적이며 인자들의 공간적 불확실성으로 인해 그 관계 자체가 추계학적인 성격을 지니기 때문이다. GSA와 달리 DGSA는 인자 사이의 상호작용을 고려할 수 있다. 예를 들어, 두 인자 p_i와 p_j가 있다고 할 때, p_j가 pi와 모델 반응 간의 관계에서 영향을 주는 인자라고 한다면 k번째 군집에서 p_i의 분포는 p_j의 크기에 따라 그 양상이 다르다는 것을 기본 원리로 삼는다.

$$i(p_j;t_m) = \begin{Bmatrix} 1 & \text{if } t_{m-1} \le p_j \le t_m \\ 0 & else \end{Bmatrix} \tag{2.15}$$

$$m = 1, \cdots M$$

$$i(p_j;t_m) = \begin{Bmatrix} 1 & \text{if } p_j = t_m \\ 0 & else \end{Bmatrix} \tag{2.16}$$

$$m = 1, \cdots M$$

식 (2.15)와 (2.16)은 p_j의 크기를 구간으로 나누기 위한 지표를 식으로서 표시한 것이다. 구간 m은 사용자의 선택에 따라 크기를 설정할 수 있으며 t_m은 m구간의 끝 값을 의미한다. 즉, $t_0 = \min(p_j)$이다. 또한, (2.15)은 인자의 형태가 연속적인 경우, (2.16)은 이산적인 인자에 해당한다.

$$\hat{d}_{k,i|j,m} = f_{\Delta cdf}(\hat{F}(p_i \mid i(p_j;t_m) = 1, c_k), \hat{F}(p_i|c_k)) \quad \forall k, m \tag{2.17}$$

식 (2.8)과 유사하게 거리를 정의할 수 있으며 두 인자간의 상호작용에 의한 모델의 반응에 영향을 미치는 민감도의 정도는 부트스트랩 기법을 이용하여 판단한다.

$$s_k(p_i|p_j) = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} \hat{d}^{S}_{k,i|j,m} \ \forall k, \ \text{with}\ \hat{d}^{S}_{k,i|j,m} = \frac{\hat{d}_{k,i|j,m}}{\hat{\hat{d}}^{(q)}_{k,i|j,m}} \tag{2.18}$$

$$s(p_i|p_j) = \frac{1}{K}\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M} \hat{d}^{S}_{k,i|j,m} \tag{2.19}$$

p_j의 변화에 따라 p_i가 모델의 반응 r에 영향을 끼치는 민감도의 표준화된 정도는 식 (2.18)과 (2.19)의 과정을 거쳐 최종적으로 구할 수 있다.

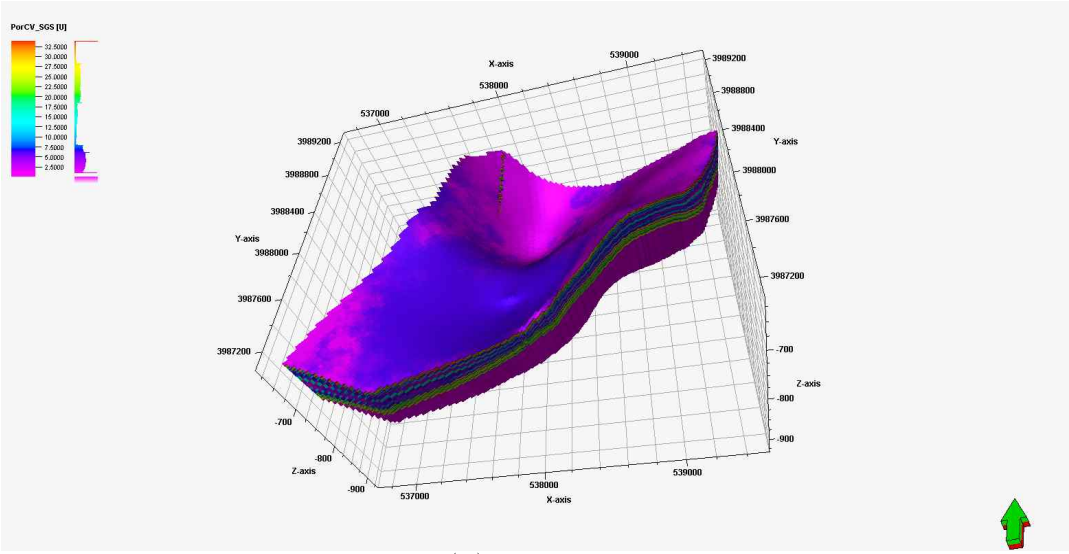
제 3 장 대수층모델 및 민감도분석인자 선정

3.1 3차원 대수층모델 및 업스케일링

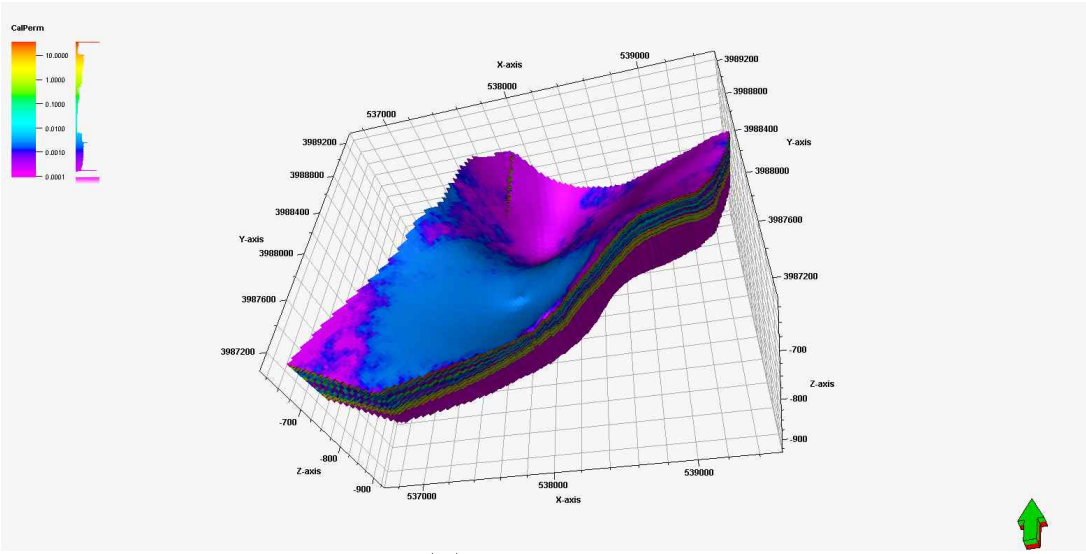
이산화탄소 지중저장 시뮬레이션 및 민감도분석을 위해 실제 포항 영일만 시추공자료, 탐사자료를 바탕으로 형성된 3차원 대수층모델을 사용하였다. 실제 대수층모델은 152 × 95 × 56의 격자시스템으로 총 808,640개의 격자를 가진다. 모델은 크게 4개의 층으로 구성되어 있으며 대수층-불투수층-대수층-비 대수층 지역으로 구분된다. 하지만 비 대수층 지역은 모델 구축과정에서 생긴 층으로 실제 시뮬레이션에는 반영이 되지 않는다.

격자시스템 상 대수층, 불투수층, 비 대수층은 각각 12개의 층으로 구성되고 있으며 가장 상위 대수층인 RES3의 경우 약 13m, 불투수층의 경우 약 20m, 가장 하부에 위치한 대수층 RES2의 경우 약 14m의 두께를 가진다. 대수층의 공극률과 유체투과율은 순차 가우스 시뮬레이션(Sequential Gaussian Simulation, SGS)으로 생성되었다. 본 연구에서는 SGS로 생성한 50개의 등가 확률 분포의 평균을 공극률과 유체투과율의 참값이라고 가정하였다.

본 연구에서 사용한 실제 모델에는 6개의 단층이 존재한다. 서쪽의 WF1, 동쪽의 EF4, EF3 단층은 동서방향으로의 유체유동을 제한하는 경계조건의 역할을 수행하며 모델 내부에는 EF1, WF2, EF2 세 개의 단층이 있다. 남북방향으로는 단층이 없는 열린 경계조건이며 남북방향의 경계에 대수층이 형성되어 있다. Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 각각 모델의 공극률, 유체투과율 분포와 모델의 형태를 보여준다. 한편, Fig. 3.3은 단층의 위치와 형태를 보여주며 마지막으로 Fig. 3.4는 모델 내 대수층과 불투수층의 두께, 암상에 관한 정보이다.



(a) Porosity



(b) Permeability

Figure 3.1 Reservoir properties in the fine model

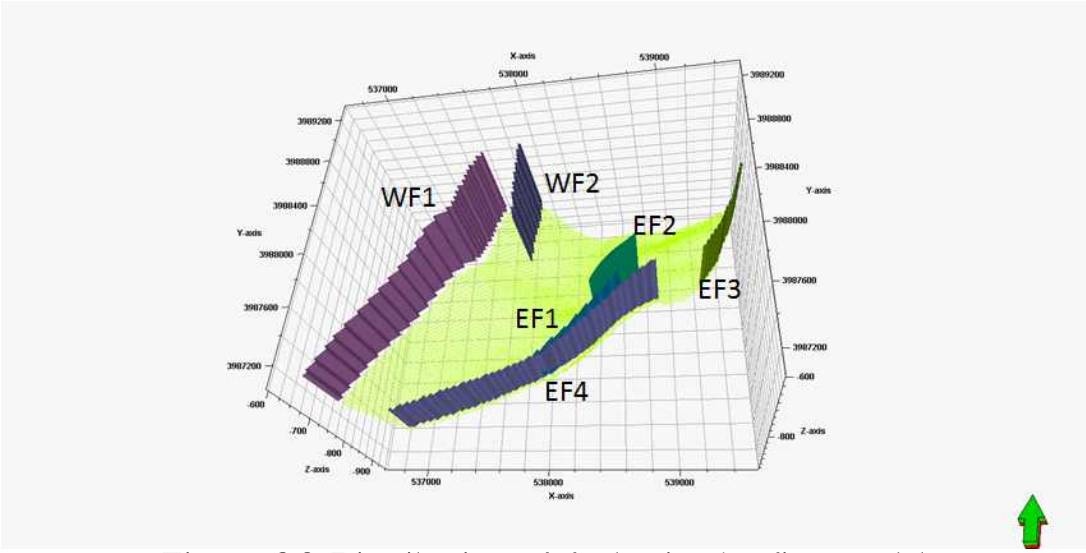


Figure 3.2 Distribution of faults in the fine model

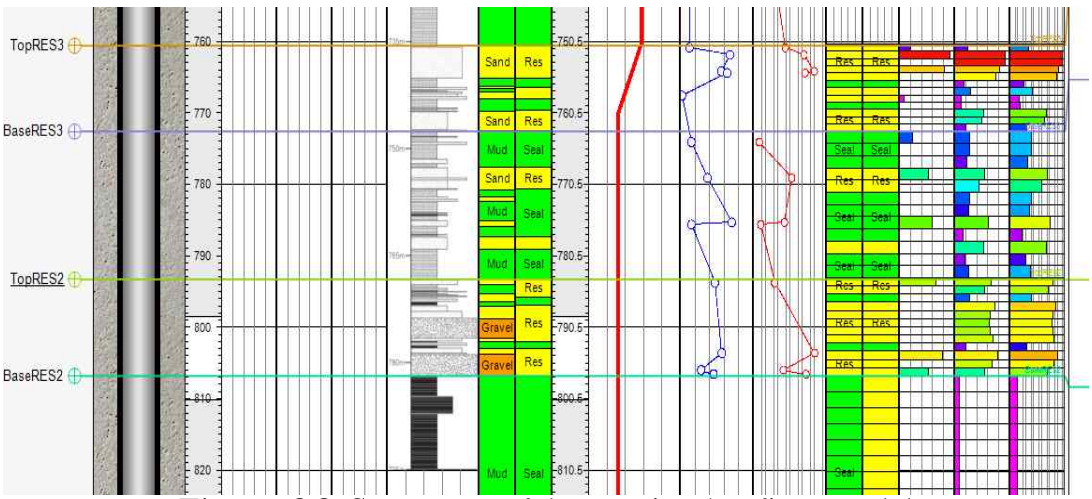


Figure 3.3 Structure of layers in the fine model

업스케일링은 초기 격자수가 많은 저류층모델의 물성을 좀 더 단순하고 적은 격자수를 가지는 모델에 재할당하는 것을 의미한다(Ampomah, 2015). 시뮬레이션을 수행함에 앞서 무엇보다 중요한 것은 비용과 시간 측면에서 경제성을 확보할 수 있는 모델을 구축하는 것이다. 특히 불확실성 평가 및 민감도분석과 같이 다수의 모델을 여러 조건으로 시뮬레이션 해야 하는 경우 이는 더욱 중요하다.

하지만, 상대적으로 격자수가 적고 단순화 된 모델을 사용하는 것은 실제 초기의 복잡한 모델을 사용하는 경우와 비교했을 때 결과값의 차이를 발생시킬 수 있다. 왜냐하면 기본적으로 저류층 시뮬레이터는 유체의 거동방정식을 유한차분법을 통해 수치적으로 해를 구하는데 초기 저류층에 할당된 물성을 그대로 유지한 채 격자수를 줄이면 수치분산오차가 발생하기 때문이다.

따라서 업스케일링 비율을 적정 수준으로 고정하고 격자에 물성을 재할당하는 과정에서 물성의 특징에 알맞은 알고리즘을 사용하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 Schlumberger사의 PETREL을 사용하여, 초기 모델의 시뮬레이션 결과값과 오차를 5% 이내로 유지할 때 까지 업스케일링을 진행하였다.

초기 많은 격자수를 일정 수준의 격자수로 줄이기 위해서는 기존 격자들을 어떤 방법으로 추출하여 새로운 격자에 할당할 것인지 설정해야 한다. 본 연구는 격자추출 방법으로 All-intersecting cells method를 사용하였다. 이 기법은 새 격자가 기존의 격자들을 지나는 모든 부분에 대한 부피의 가중평균으로 추출하는 방법이다. 이 방법은 업스케일링에 소요되는 시간 자체는 길지만, 본래 격자와의 오차를 적게 유지할 수 있는 방법으로 널리 사용되고 있다.

Fig. 3.4를 보면, 새롭게 설정한 크기의 큰 격자가 기존의 격자들을 덮고 있는 형상이다. 여기서 새 격자가 많은 부피를 덮고 있는 가운데 지역은 이 지역의 물성값이 부피에 비례하여 온전히 추출된다. 반면, 격자가 덮고 있긴 하지만 그 부피가 작은 부분은 부피에 비례하여 새로운 격자의 물성에 적은 영향을 미치게 된다. 이와 같은 방법을 통해 추출된

물성값을 추출된 본래 격자의 부피에 비례한 가중평균을 구하여 새로운 격자의 물성값으로 배정한다. 평균을 구하는 방법에 있어서는 유체포화도, 공극률, 수평유체투과율과 같은 연속적인 인자에 적합한 산술평균을 사용하였다.

최종적으로 110 × 70 × 56, 총 431,200 개의 격자를 가진 업스케일된 모델을 구축하였다. Z축 방향으로 격자수를 줄이지 않은 이유는 실제 초기 모델의 각 층과 단층모델을 보존하기 위함이다.

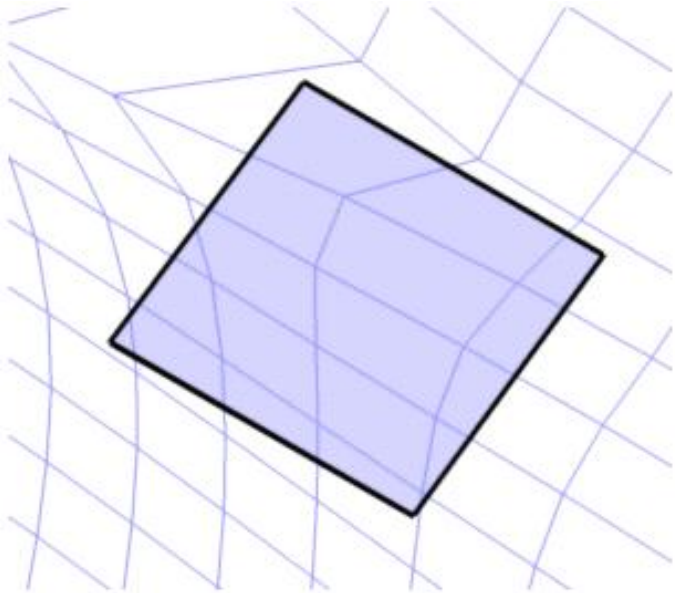
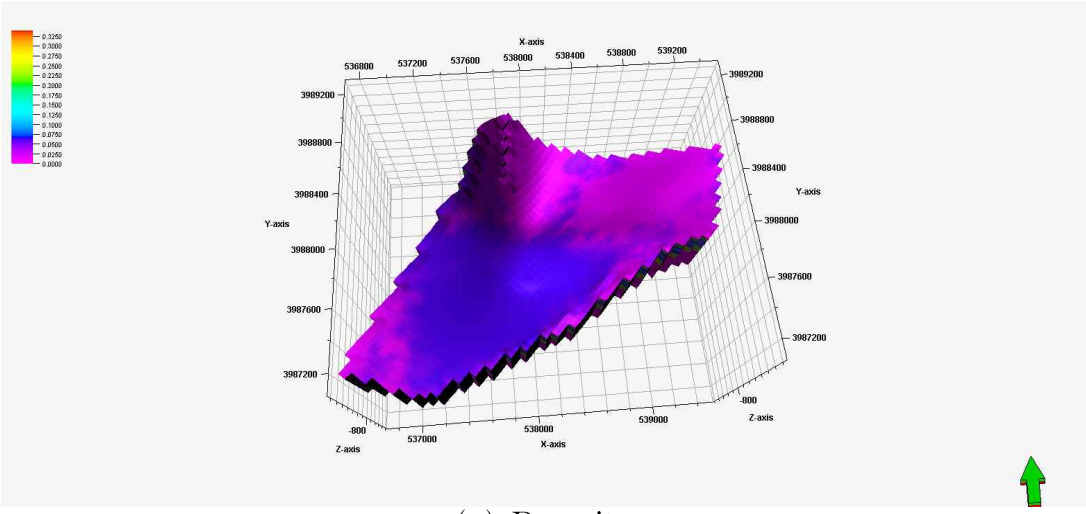
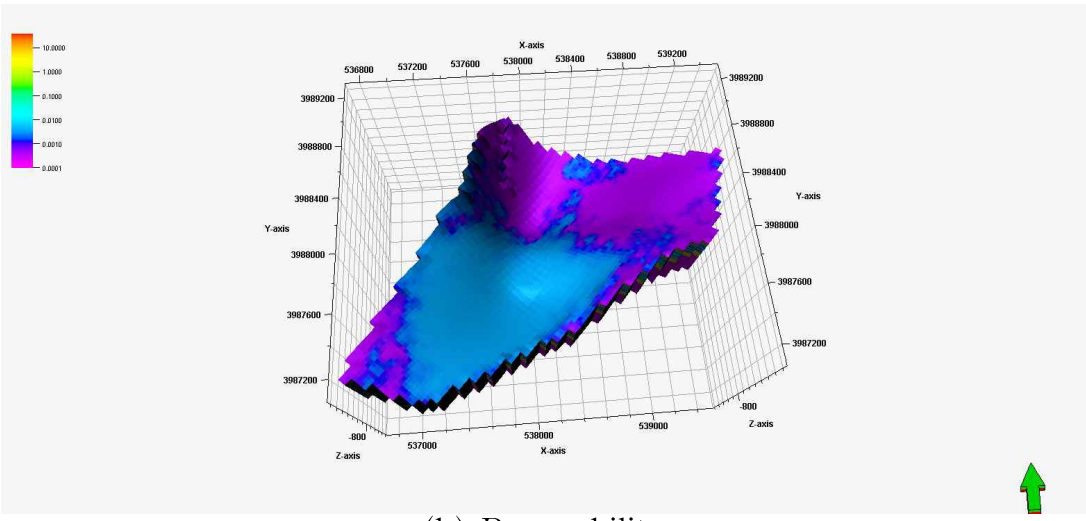


Figure 3.4 All-intersecting cells sampling method

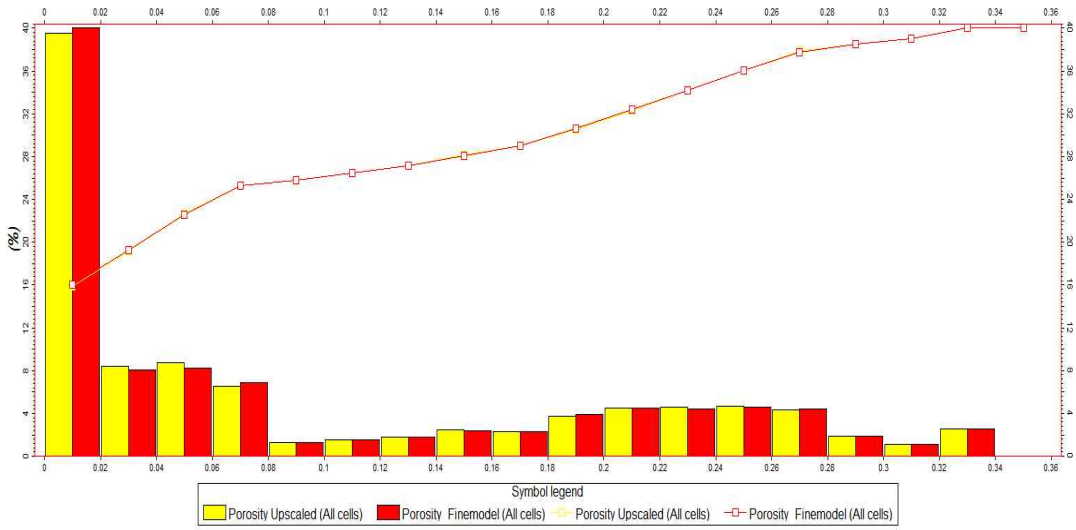


(a) Porosity

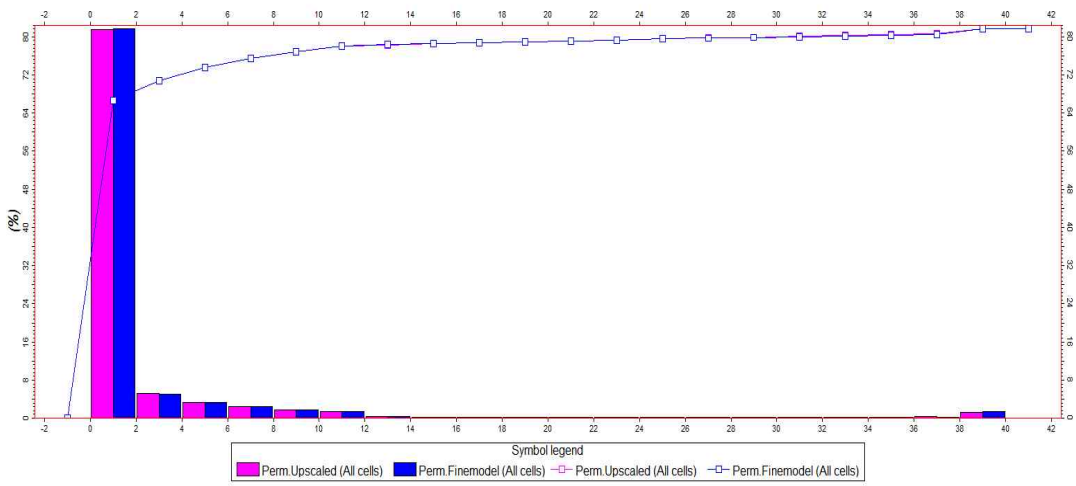


(b) Permeability

Figure 3.5 Reservoir properties in the upscaled model



(a) Porosity



(b) Permeability

Figure 3.6 Porosity and permeability histogram and cumulative density function of fine model and upscaled model

Fig. 3.6은 초기 모델의 공극률, 유체투과율 분포와 업스케일된 모델의 공극률, 유체투과율 분포를 히스토그램과 누적확률분포로 상호 비교하여 도식한 것이다. 그림에서 보듯이, All-intersecting cells method와 산술평균을 사용하여 구한 업스케일된 모델의 물성값 분포와 실제 초기 모델의 물성값 분포가 매우 유사함을 알 수 있다. 또한, 업스케일된 모델의 시뮬레이션 결과 Fig. 3.7과 같이 초기 모델과 유사한 양상을 보이고 있으며 Table 3.1에서는 세 종류의 동적자료가 모두 5% 이내의 오차를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

이를 바탕으로 이산화탄소 지중저장 시뮬레이션을 수행함에 있어서 위의 과정을 거쳐 생성된 업스케일 모델이 실제 초기 모델을 잘 대표하며 시뮬레이션의 경제성을 확보할 수 있으므로 최종 분석모델로 선정하였다.

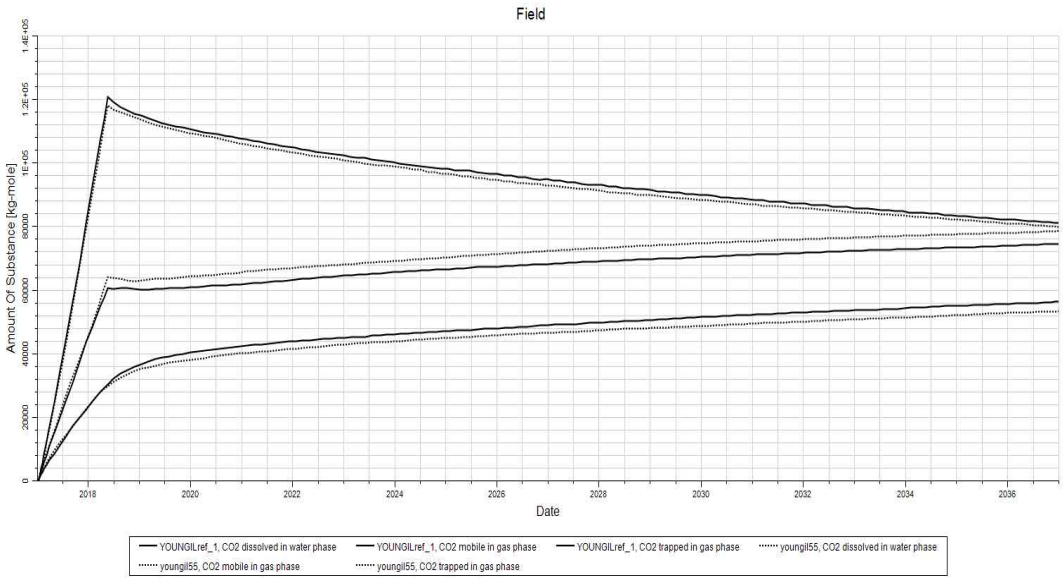


Figure 3.7 Simulation results of the fine and the upscaled model

Table 3.1 Relative error of model responses

Model response (KG-Mole)	Relative error (%)
CO_2 dissolved in water phase	2.62%
CO_2 mobile in gas phase	0.79%
CO_2 trapped in gas phase	2.55%

3.2 시뮬레이션 조건 및 민감도분석 인자선정

본 연구는 포항 영일만 해상분지 CO_2 주입실증 프로젝트의 대상이 되는 실제 초기 모델을 바탕으로 업스케일된 모델을 시뮬레이션에 적용하였으며 시뮬레이터는 Schlumberger사의 ECLIPSE 300을 사용하였다. 모델의 X축 방향, Y축 방향의 넓이는 각각 2844, 2263m 이며 깊이는 약 323m이다. 초기에 물이 단상으로 포화되어 있는 상태에서 CO_2를 주입하는 2상 유체거동의 형태이며 주입유량과 주입기간은 실제 프로젝트의 계획을 바탕으로 작성하였다. 대수층의 초기압력은 기준 깊이에서 정수압 구배를 사용하여 설정하였고, 최대주입공저압은 140 bar로 설정하였다 (Choi, 2015). 자세한 내용과 기타 조건은 Table 3.2에 정리하였다.

Table 3.2 Aquifer model description and simulation parameters

Parameters	Value
Aquifer grid system	110 × 70 × 56 (Corner point grid)
Aquifer width	2844m (X-axis), 2263m (Y-axis)
Aquifer depth	323m (from -611m to -934m)
Phases	Water, CO_2 (supercritical gas)
Injection well location	(50, 38)
Injection rate	20 ton/day or 40 ton/day
Injection period	500 days
Simulation period	20 years
Initial pressure	60 bar @ 620m
Bottom hole pressure limit	140 bar
Ensemble Number	100

민감도분석을 위하여 시뮬레이션에 반영되는 광역인자 중에서 불확실성이 크거나 정보가 부족한 인자 총 15개를 선정하였다. 15개의 인자 중 염도와 수직수평 유체투과율 비는 이산적인 분포를, 나머지 13개의 인자는 연속적인 분포를 갖는다. 한편, 공극률이나 유체투과율과 같은 격자단위의 물성값은 모델 생성과정에서 이미 참으로 가정하였으므로 제외하였다. 분석대상 인자가 설정되면 민감도분석을 수행하기 위해서 인자값의 범위를 제한하거나 분포를 획득하는 것이 필수적이다. 이 과정에서 물리적으로 타당성을 확보하여야 하며 지나친 특이값은 제외하여 실제의 불확실성을 잘 반영할 수 있어야 한다.

(1) 수직유체투과율 수평유체투과율 비 (k_v/k_h ratio)

SGS를 통해 생성된 격자단위의 유체투과율은 수평방향 유체투과율이기 때문에 수직방향의 유체투과율을 수평유체투과율에 일정 값을 곱함으로써 구하고자 하였다. 본 연구에서는 k_v/k_h ratio로 0.001, 0.01, 0.1, 1의 값을 사용하였다.

(2) 대수층 온도

대수층의 온도는 포항지역의 평균지열구배경사(Song et al., 2010)와 감압정을 통한 포항분지 대수층의 이산화탄소 저장능력평가 연구(Hwang et al., 2016)를 바탕으로 중간값을 50℃로 설정한 뒤 최솟값과 최댓값을 각각 40℃와 60℃로 설정하여 불확실성을 고려하고자 하였다.

(3) EF1 단층 투과율 (4) EF2 단층 투과율 (5) WF2 단층 투과율

Fig. 3.2 와 같이 대수층모델 내부에는 동쪽방향에 EF1, EF2, 서쪽방향에 WF2와 같은 단층이 존재한다. 유체유동을 제한하는 경계조건의 형태의 단층인 EF3, EF4, WF1은 제외한 내부의 단층 투과율은 0과 1사이의 값을 가질 수 있다고 가정하였다.

(6) EF1 단층임계압력 (7) EF2 단층임계압력 (8) WF2 단층임계압력

대수층의 공극압이 임계치를 넘어서는 경우 단층이 재 활성화되어 미소지진과 같은 현상을 발생시켜 주입된 이산화탄소의 지중저장 안정성을 위협할 수 있다. 포항분지 단층활성화 가능성에 관한 연구(Lee at al., 2017)의 실험결과 EF1, EF2, WF2의 압력상승 허용범위는 3 ~ 6 MPa로 나타났다. 본 연구는 위 연구의 실험결과와 시뮬레이션을 위해 설정한 기준깊이에서의 대수층 압력을 바탕으로 세 단층의 임계압력 최솟값을 90 bar, 최댓값을 120 bar로 설정하였다.

(9) 염도

지중저장의 대상이 되는 지역이 해상분지의 염수대수층이므로 염도에 관한 정보를 획득할 수 없는 상황에서 일차적으로 표면 해수 염도인 3.5% (35000 ppm)을 염도범위 설정의 기준값으로 고려하였다. 염수의 구성성분은 크게 물(H_2O), 염화나트륨(NaCl), 염화칼륨($CaCl_2$)으로 구성되었다고 가정하였으며 염도에 따른 염화나트륨과 염화칼륨의 구성비는 ECLIPSE 300이 제공하는 데이터파일의 기준비율을 사용하였다. 본 연구에서는 10000, 30000, 50000, 70000, 90000 ppm 총 다섯 가지의 염도를 가정하였다.

물과 이산화탄소의 상대유체투과율은 이산화탄소 주입 후 대수층 내 거동에 많은 영향을 끼친다. 특히, 시간에 따른 CO_2 플룸의 양상과 대수층 내 CO_2 포화도의 분포가 상대유체투과율 값과 모델링방법에 따라 달라지며, CO_2가 트랩 되는 기작에도 영향을 미치기 때문에 궁극적으로는 CO_2 저장의 안정성에도 영향을 미친다. 보통 상대유체투과율 곡선은 해당 지층의 코어 자료를 바탕으로 얻지만 포항 영일만 해상분지의 코어 자료와 실험데이터가 없어 상대유체투과율 정보를 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 Canada Nisku 염수층의 상대유체투과율 및 모세관압 실험 결과(Bennion and Bachu, 2006)를 바탕으로 Sarkarfarshi 등이 도출한 상대유체투과율 관련 자료를 사용하였다. 한편, 물과 이산화탄소 2상

유동에 관한 상대유체투과율 모델 중 일반적으로 사용되는 Brooks-Corey 모델을 이용하여 물과 이산화탄소의 상대유체투과율과 모세관압을 유도하였다. 구체적인 관계식은 아래 식 (3.1)~(3.5)와 같다.

$$S_e = \begin{cases} \dfrac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} & S_w > S_{rw} \\ 0 & S_w \le S_{rw} \end{cases} \tag{3.1}$$

$$k_{rw} = S_e^{\alpha_w} \tag{3.2}$$

$$k_{rCO_2} = \beta(1 - S_e)^{\alpha_{CO_2}} \tag{3.3}$$

$$P_c = P_{CO_2} - P_w \tag{3.4}$$

$$P_c = AS_w^{-\sigma} \tag{3.5}$$

S_e = Effective saturation

S_{rw} = Residual water saturation

α_n = Empirical parameter for CO_2 relative permeability

α_w = Empirical parameter for water relative permeability

β = End-point relative permeability of CO_2

P_c = Capillary pressure

A = Entry capillary pressure

σ = Empirical parameter for capillary pressure

(10) α

본 연구에서는 편의를 위해 $\alpha_n=\alpha_w=\alpha$ 라고 가정하며 평균 0.992, 분산 0.01을 갖는 로그정규분포 내에서 연속적인 값을 가질 수 있다고 가정하였다.

(11) β

β는 이산화탄소의 최대 유체 포화도에서의 상대유체투과율값을 의미

한다. 본 연구에서는 평균 -1.938, 분산 0.385를 갖는 로그정규분포를 가정하였다.

(12) A

최소 임계모세관압은 새로운 유체가 기존의 유체로 채워져 있는 공극으로 침투하기 위해 필요한 압력을 말한다. 본 연구에서는 평균 13.249, 분산 0.632를 갖는 로그정규분포를 가정하였다.

(13) σ

특정 물포화도 에서의 모세관압을 계산하기 위한 인자로서 본 연구에서는 평균 0.346 분산 0.01을 갖는 로그정규분포를 가정하였다.

(14) S_{rw}

잔류 물포화도는 이산화탄소 주입을 통해 기존 공극에 채워져 있던 물을 대체해 나가는 과정에서 공극에 남아있는 물포화도를 의미한다. 본 연구에서는 평균 - 0.924 분산 0.2를 갖는 로그정규분포를 가정하였다.

(15) S_{rg}

이산화탄소가 주입되면서 기존의 공극을 채우고 있던 물을 밀어내는 배수 과정에서는 물포화도가 감소함에 따라 이산화탄소의 상대유체투과율은 증가하고 물의 유체투과율은 감소한다. 한편, 이산화탄소 플룸이 대수층 내에서 이동해감에 다시 물에 의해 공극의 이산화탄소가 밀려나는 현상이 발생하는데 이를 침윤이라고 한다(Benson et al., 2013). 이 과정에서 이산화탄소의 연속적인 상이 끊어지고 공극에 갇히는데 이 포화도가 잔류가스포화도이다. 그러므로 이산화탄소 주입에 따른 물-이산화탄소 2상의 유체거동과 저장기작을 설명하기 위해서는 각각의 과정에 따른 상대유체투과율 곡선이 따로 필요하다. 하지만, 침윤 현상의 경우 실험방법이 어렵고 실험데이터가 현저히 부족하여 침윤 현상을 효과적으로 모사할 수 있는 상대유체투과율 곡선을 구하기가 매우 어렵다. 또한, 임의

의 침윤 상태에서의 상대유체투과율 곡선을 추가하여 시뮬레이션을 수행한 결과 시뮬레이션 시간에 있어 추가하지 않았을 때보다 약 6배 더 시간이 소요되었다.

이에 본 연구에서는 두 가지의 상대유체투과율 곡선을 고려하지 않고 배수를 나타내는 상대유체투과율 모델을 사용하되 잔류가스포화도를 직접 도출함으로서 이를 대신하였다. 본 연구에서 잔류가스포화도를 사용한 방법은 Choi 등 (2015) Zhao 등 (2010) 이 사용한 방법과 유사하다. 상대유체투과율 곡선을 만들 때, 가장 핵심적인 인자인 잔류 물포화도와 연동하여 생성하였으며, 최댓값 0.0866, 최솟값 0.0406을 가진다. Table 3.3은 본 연구에서 선정한 민감도분석 대상인자들의 분포와 종류를 나타낸다. Fig. 3.8과 3.9는 Table 3.3을 바탕으로 잔류 물포화도와 이산화탄소 상대유체투과율 최댓값의 확률분포를 그린 것이다.

Table 3.3 Distribution of aquifer parameters

Parameters	Distribution
k_v/k_h ratio	Discrete Uniform [0.001, 0.01, 0.1,1]
Reservoir temperature, ℃	Uniform [55 60]
EF1 transmissibility multiplier	Uniform [0 1]
EF2 transmissibility multiplier	Uniform [0 1]
WF2 transmissibility multiplier	Uniform [0 1]
EF1 threshold pressure, bar	Uniform [90 120]
EF2 threshold pressure, bar	Uniform [90 120]
WF2 threshold pressure, bar	Uniform [90 120]
α (Empirical parameter for relative permeability)	Lognormal (0.991, 0.01)
End-point relative permeability of CO2	Lognormal (-1.938, 0.385)
Entry capillary pressure, Pa	Lognormal (13.249, 0.632)
σ (Empirical parameter for capillary pressure)	Lognormal (0.346, 0.01)
Residual water saturation	Lognormal (-0.924, 0.2)
Salinity, ppm	Discrete Uniform [10000, 30000, 50000, 70000, 90000]
Residual gas saturation	Max = 0.0866, Min = 0.0406

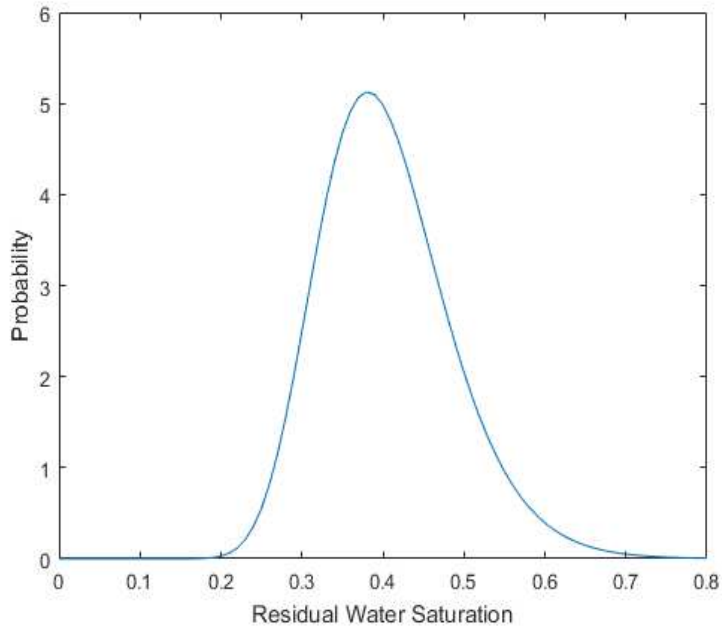


Figure 3.8 Probability density function of residual water saturation

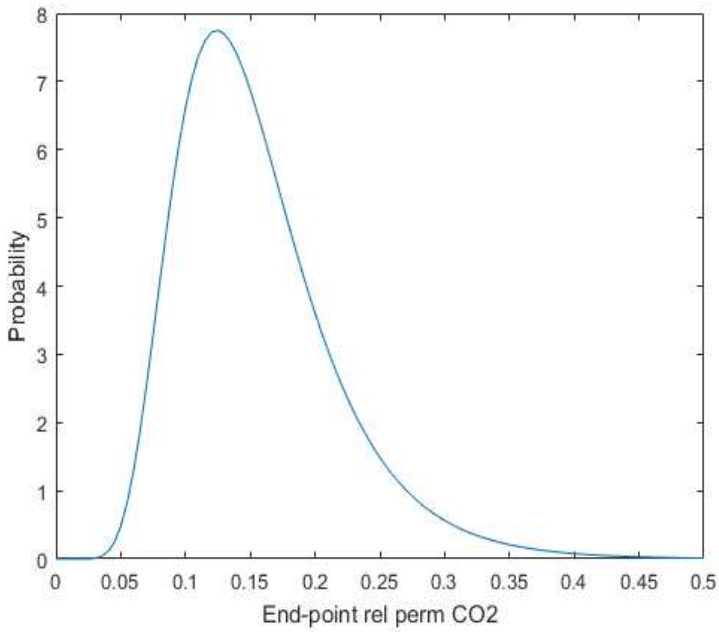


Figure 3.9 Probability density function of CO_2 end-point relative permeability

3.3 라틴 하이퍼큐브 샘플링 및 시뮬레이션 수행

라틴 하이퍼큐브 샘플링(LHS) 방법을 통해 3.2에서 선정한 총 15개의 인자와 그 분포로부터 모델 100개의 시뮬레이션 및 민감도분석을 위한 100개의 인자집합을 추출하였다. 이 과정에서 15차원 공간의 인자들의 분포가 가장 골고루 형성되어 있는 추출결과를 만들기 위해 LHS 과정을 100회 반복하였다. 100개의 인자집합이 만들어지면 모델 100개에 대하여 각각의 저류층 시뮬레이션 입력자료로 Table 3.2와 함께 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 결과로 얻는 값은 WBHP(Well Bottom Hole Pressure), FPR(Field Pressure), WGIR(Well Gas Injection Rate), FWCD(Fraction mole of CO_2 dissolved in water phase), FGCDM(Fraction mole of CO_2 mobile in gas phase), FGCDI(Fraction mole of CO_2 trapped in gas phase) 이다.

Fig. 3.10과 Fig. 3.11은 LHS를 100회 실시한 후 최종 추출된 각 인자의 결과를 히스토그램으로 도식한 것이다. 한편, Fig. 3.12와 Fig. 3.13은 추출된 100개의 인자 집합 중 상대유체투과율과 관련한 인자들을 이용해 생성한 상대유체투과율 곡선과 물포화도에 따른 모세관압 곡선을 보여준다.

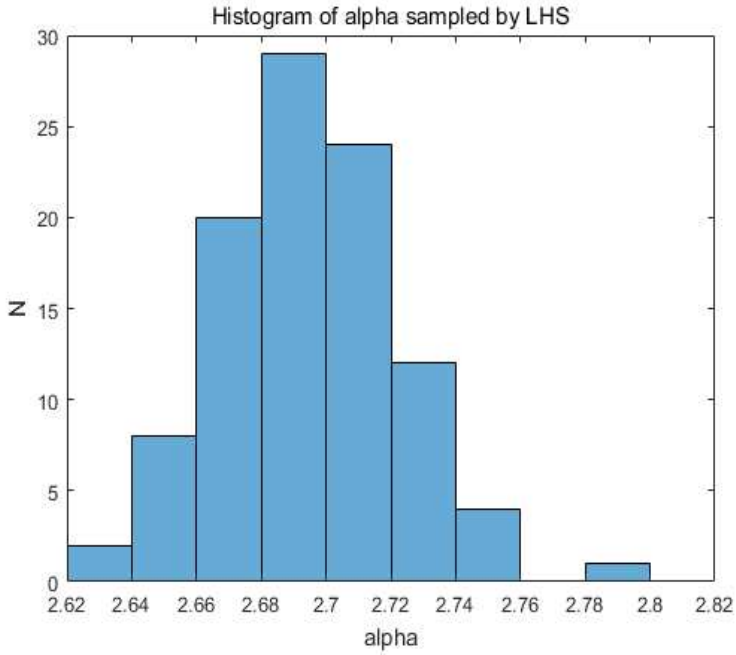


Figure 3.10 Histogram of parameter alpha sampled by LHS

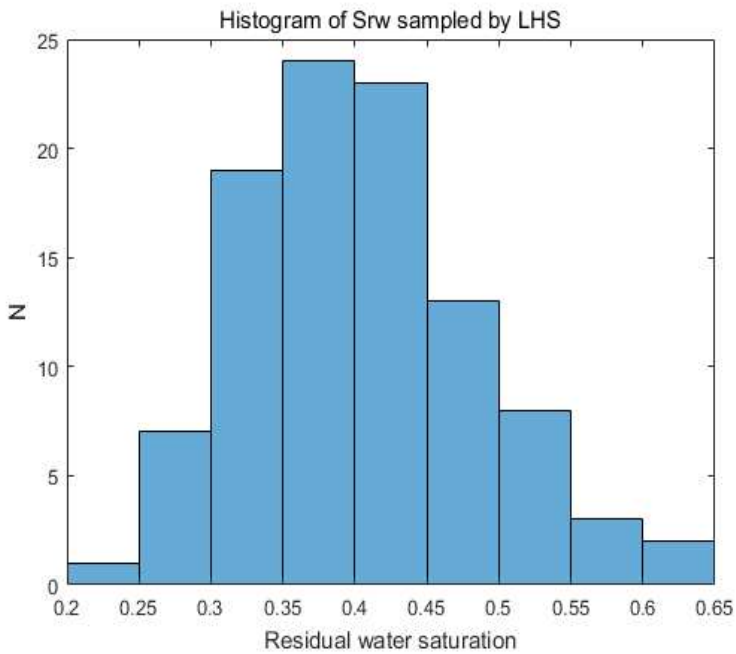


Figure 3.11 Histogram of parameter S_{rw} sampled by LHS

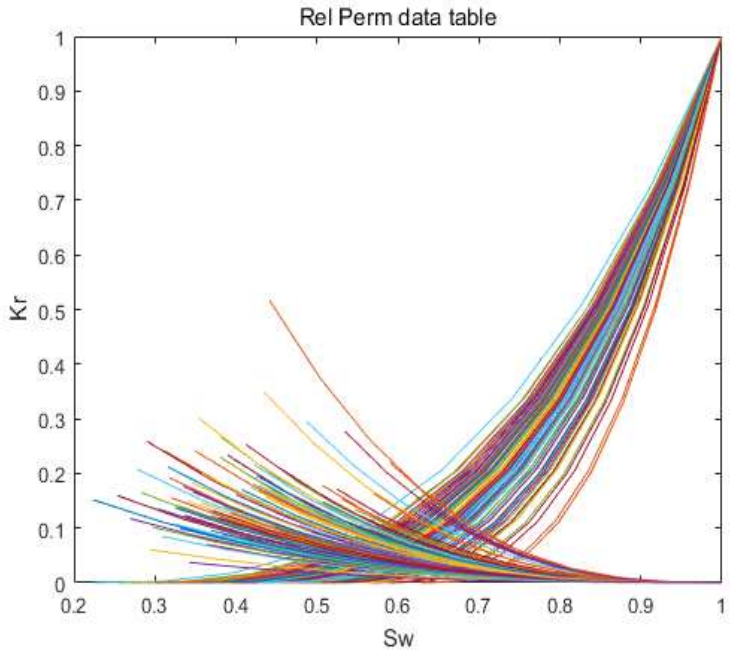


Figure 3.12 100 relative permeability curves generated by LHS

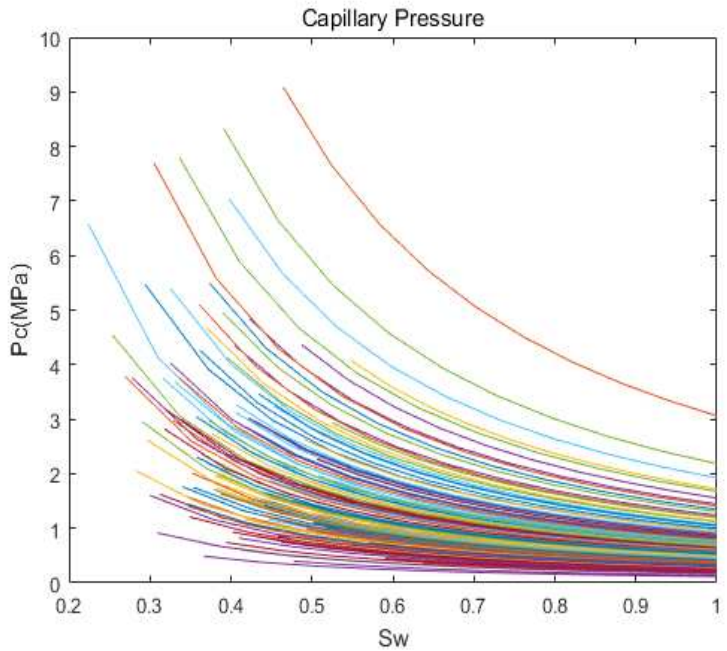


Figure 3.13 100 capillary pressure curves generated by LHS

제 4 장 민감도분석

4장에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 분석대상 인자로 선정한 15개의 인자에 대하여 민감도분석을 실시한다. 4.1에서는 실제 프로젝트의 일일주입유량인 20 ton/day 일 때의 각 인자들의 민감도를 분석하며 4.2에서는 일일주입유량의 두 배일 때에 대하여 분석한다. 100개 모델의 반응으로서 사용하는 시뮬레이션 결과값은 주입정의 WBHP, 대수층의 FWCD, FGCDI 이다.

4.1 주입유량 20 ton/day

먼저, 포항분지 해상 소규모 실증 프로젝트의 중규모 저장실증을 위한 단계의 일일주입유량인 20ton을 500일에 걸쳐 주입하였다. 주입기간인 500일이 지나면 주입정은 폐쇄되며 주입시점부터 약 20년간 대수층의 반응을 관찰하게 된다. 100개의 시뮬레이션 결과는 K-medoids 군집화기법을 통해 3개의 군집으로 분류되며 이에 따른 각 인자들에 대한 누적확률분포와 이를 바탕으로 한 통계검정을 통해 민감도를 평가할 수 있다.

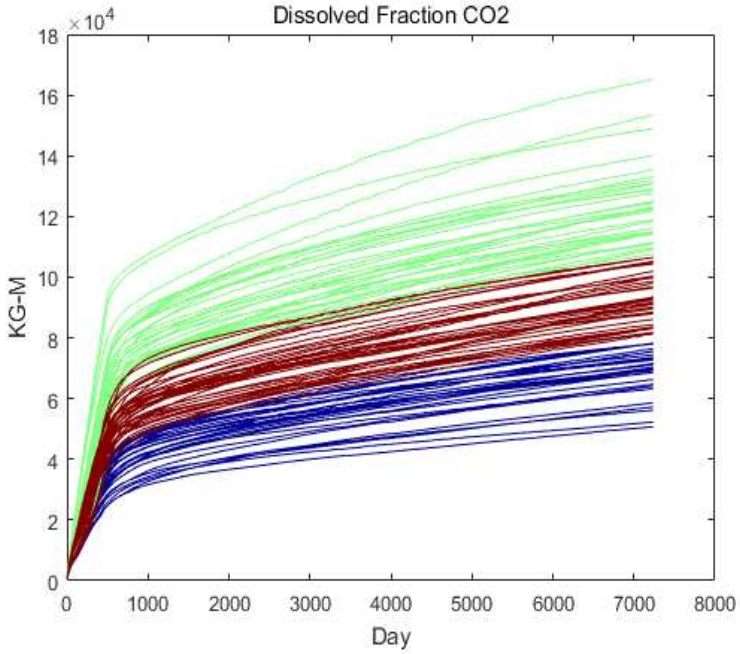


Figure 4.1 Clustering result of 100 models by FWCD

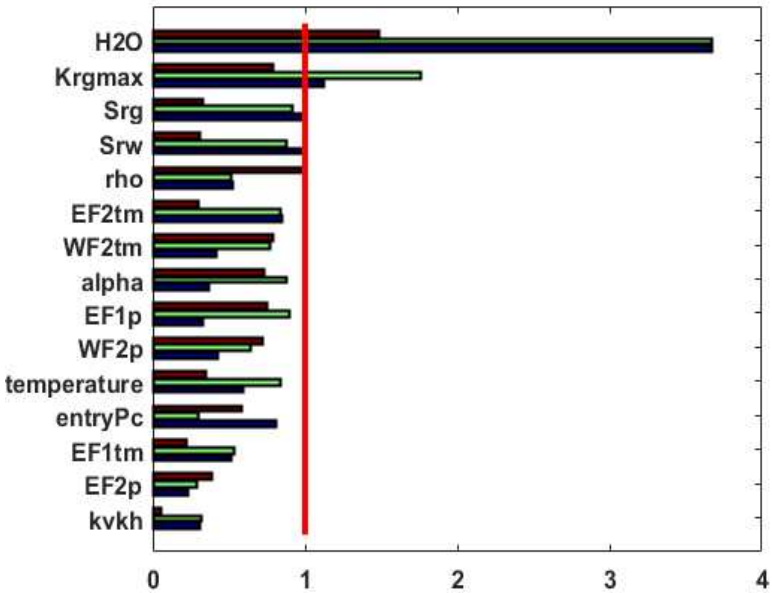


Figure 4.2 Parameter sensitivity for FWCD by the cluster

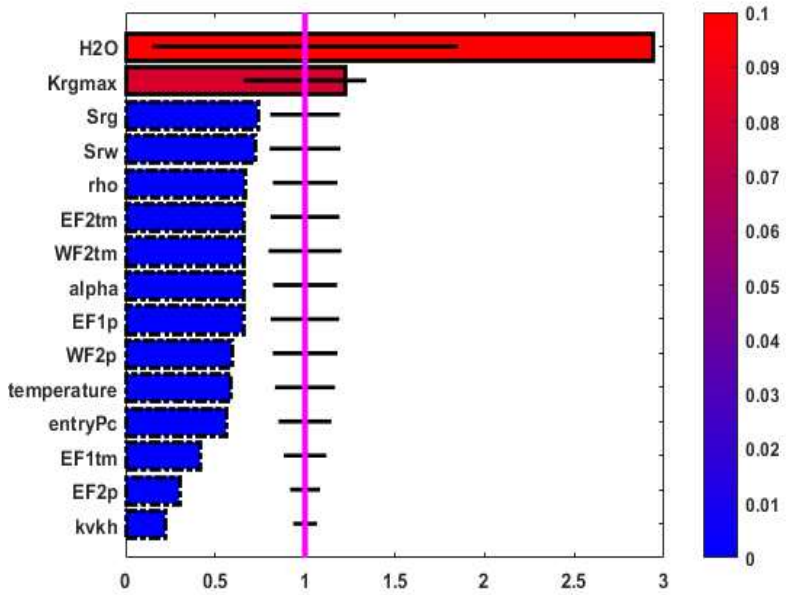


Figure 4.3 Standardized sensitivity for FWCD

Table 4.1 Standardized sensitivity for FWCD

Parameter	Standardized sensitivity
Salinity (ppm)	2.9376
Krgmax	1.2189
S_{rg}	0.7350
S_{rw}	0.7192
rho	0.6631
EF2tm	0.6566
WF2tm	0.6551
alpha	0.6538
EF1p (MPa)	0.6535
WF2p (MPa)	0.5884
temperature (℃)	0.5858
entry Pc (MPa)	0.5598
EF1tm	0.4155
EF2p (MPa)	0.2973
kvkh	0.2214

Fig. 4.1은 시뮬레이션의 결과, 100개의 모델에 대하여 물에 용해된 CO_2의 양을 보여주는 그래프이다. 군집화 결과, 용해된 CO_2양에 따라 3개의 군집으로 분류되었다. CO_2가 주입되고 CO_2 플룸이 대수층 내에서 이동함에 따라 3개의 군집 모두 용해된 양이 점점 늘어나고 있는 양상을 보여주고 있다. Fig. 4.2는 각각의 인자에 대해 군집별로 민감도를 수치로 표현하여 막대그래프로 그린 것이다. 부트스트랩 기법을 통해 유의수준 5%의 L1-norm거리를 조사하여 각 인자에 대한 군집과 사전분포 사이의 L1-norm 거리가 유의수준으로 설정한 거리보다 크면 이 인자는 민감하다고 판단하기 때문에 1을 기점으로 빨간색 기준선 설정하였다.

Fig. 4.2의 경우 염도와 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값 인자가 각각 3개의 군집과 2개의 군집에서 유의수준 거리이상의 차이를 보이고 있으므로 이 두 가지 인자는 FWCD에 민감한 인자로 분석되었으며 나머지 13개의 인자는 각각 모든 군집에서 1을 넘기지 못하였으므로 민감하지 않은 인자로 판단되었다. Fig. 4.3은 모든 군집에 대한 표준화된 민감도를 막대그래프로 나타낸 것으로 Fig. 4.2에서 각 인자의 군집별로 표시한 민감도의 군집 개수에 대한 평균이다. Fig. 4.3에서는 유의수준 10%와 0%에 대한 차이를 이용하여 1을 기준으로 신뢰구간을 표시하였다.

Table 4.1은 Fig. 4.3의 표준화 민감도 수치를 각 인자별로 표시하였다. 결론적으로, 주입유량이 20 ton/day일 때 물에 용해된 용존 CO_2양에 대하여 염도와 이산화탄소의 최대 상대유체투과율 값이 민감한 인자로 판별되었다. Fig. 4.4와 Fig. 4.5는 민감한 인자로 분석된 두 인자에 대한 군집별 누적확률분포를 도시한 것이다. 누적확률 분포의 양상을 보았을 때 물의 비율이 큰, 즉 염도가 낮은 군집에서 용해된 CO_2의 양이 많으며 반면에 염도가 높은 군집에서는 용해된 CO_2의 양이 적은 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라, CO2의 상대유체투과율 최댓값이 클수록 CO_2의 용해도가 큰 것을 파악할 수 있다.

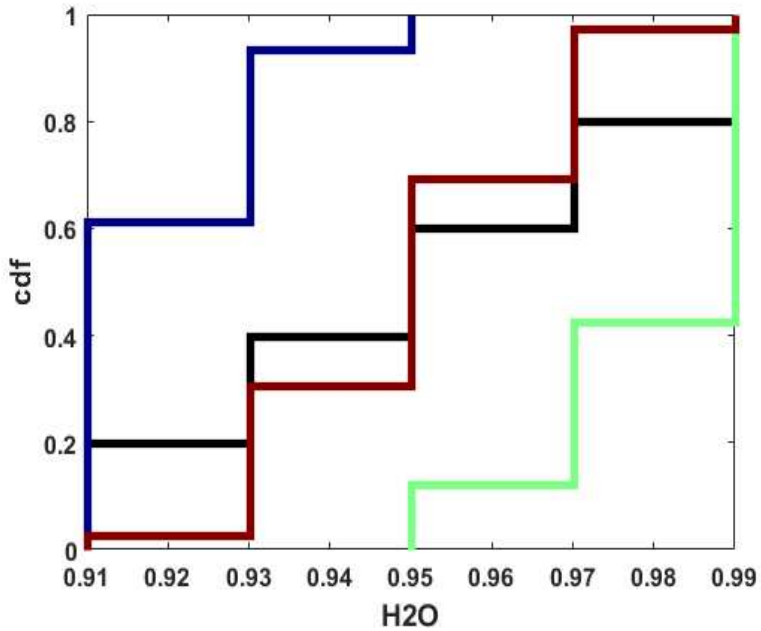


Figure 4.4 Salinity CDF by cluster and prior distribution for FWCD

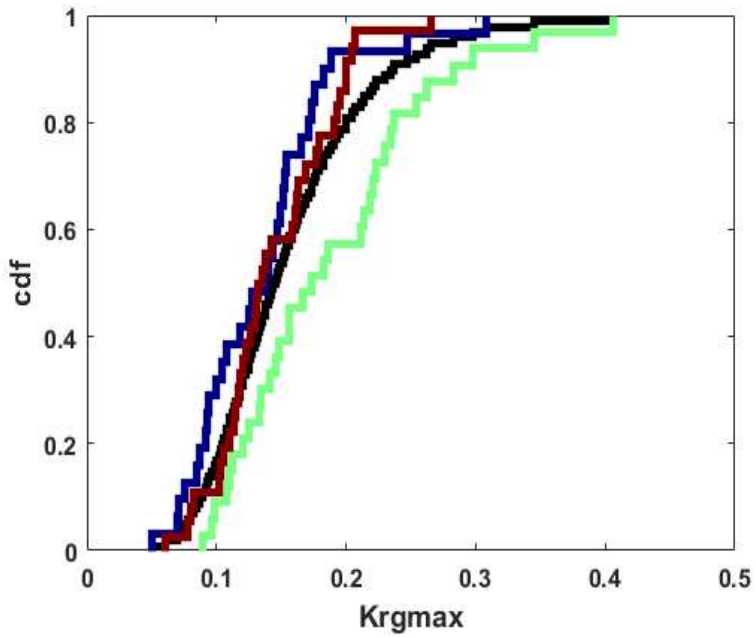


Figure 4.5 Krgmax CDF by cluster and prior distribution for FWCD

인자의 개수가 총 15개이므로 인자간의 상호관계는 총 15 × 14 의 210가지 경우의 수가 발생한다. 210가지의 모든 상호관계를 Fig. 4.3의 P 파레토 플롯이나 Table 4.1의 표준화된 민감도 수치로 제시하기엔 무리이므로 본 연구에서는 버블 플롯을 통해 인자들의 상호 관계를 먼저 파악하기로 한다.

Fig. 4.6의 버블 플롯에서 초록색 인자는 다른 인자들에 의해 영향을 받는 인자들의 종류를 나타낸 것이며 분홍색 인자는 다른 인자들에게 영향을 주는 인자들을 의미한다. 원의 크기는 모델의 반응에 따른 해당 인자의 민감도의 상대적인 크기를 의미하며 원들 사이의 거리는 영향을 주고받는 정도를 상대적인 거리이다. 그림을 통해서 상대유체투과율 곡선 관련 인자들은 서로 밀접한 관련을 맺고 있는 반면 수직수평유체투과율비와 같은 인자는 다른 인자들에 비해 멀리 떨어져있는 것으로 보아 나머지 인자들에 상대적으로 영향을 주지 못하는 인자로 분석할 수 있다.

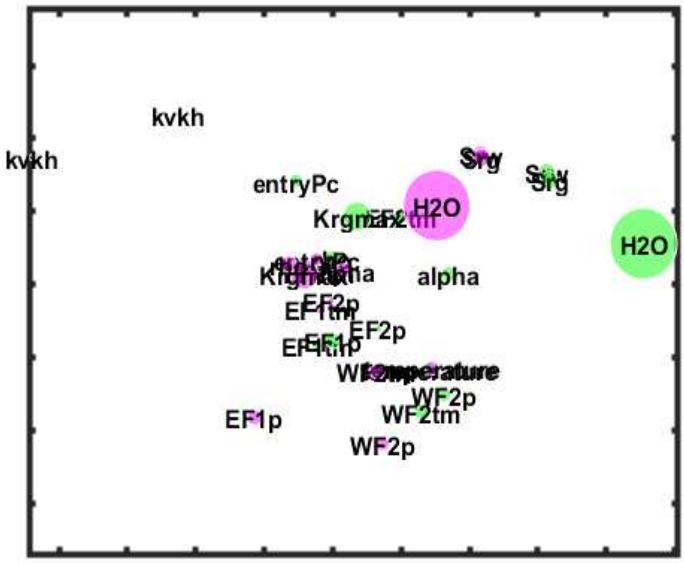


Figure 4.6 Bubble plot of parameters interaction for FWCD

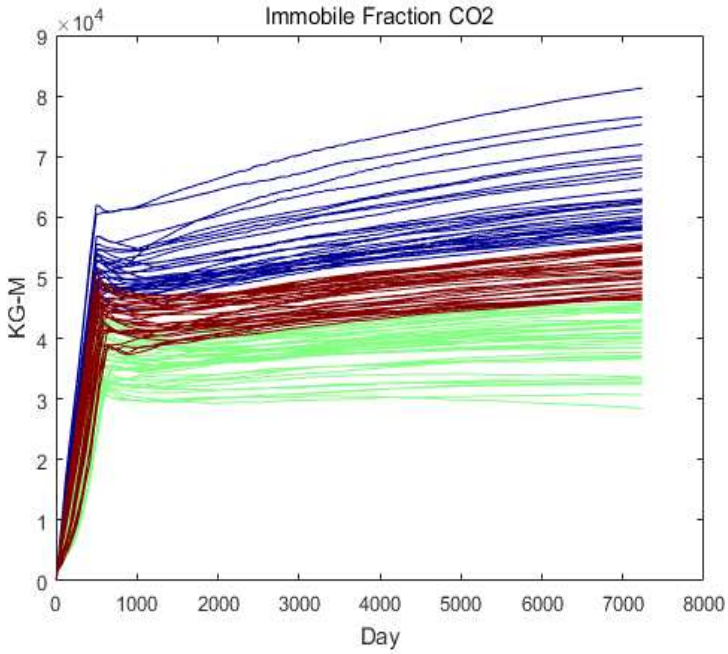


Figure 4.7 Clustering results of 100 models by FGCDI

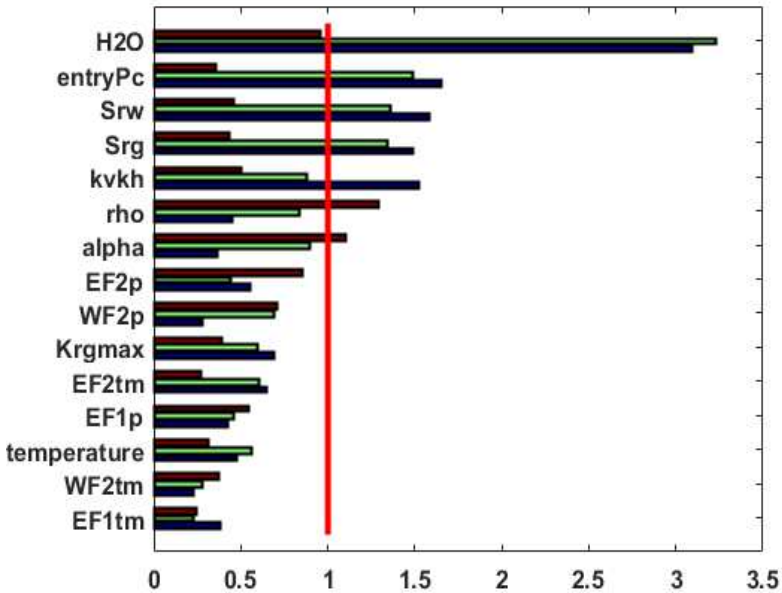


Figure 4.8 Parameter sensitivity for FGCDI by cluster

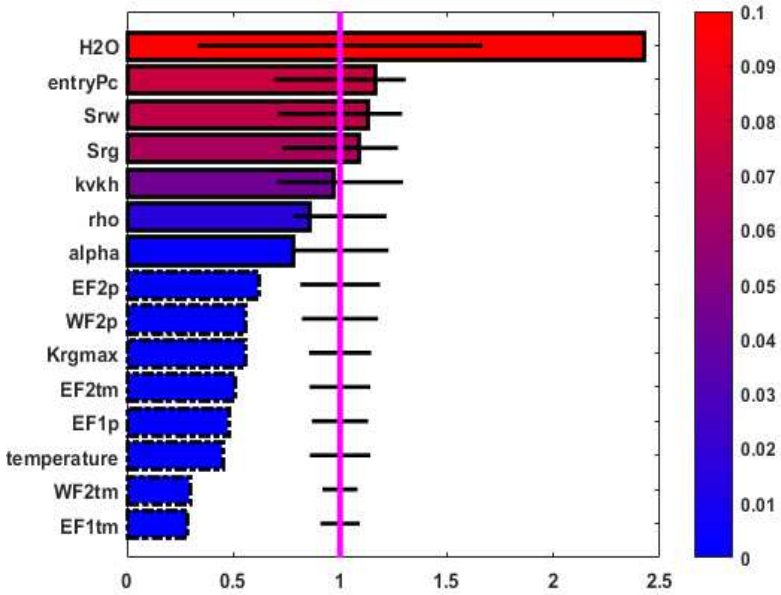


Figure 4.9 Standardized sensitivity for FGCDI

Table 4.2 Standardized sensitivity for FGCDI

Parameter	Standardized sensitivity
Salinity (ppm)	2.4234
entryPc (MPa)	1.1619
S_{rw}	1.1297
S_{rg}	1.0822
kvkh	0.9636
rho	0.8531
alpha	0.7803
EF2p (MPa)	0.6129
WF2p (MPa)	0.5557
Krgmax	0.5527
EF2tm	0.5048
EF1p (MPa)	0.4729
temperature (℃)	0.4455
WF2tm	0.2912
EF1tm	0.2836

Fig. 4.7은 시뮬레이션의 결과, 100개의 모델에 대하여 공극에 갇힌 CO_2의 양을 보여주는 그래프이다. 군집화 결과, 공극에 갇힌 CO_2 양은 3개의 군집으로 분류되었다. 용해된 CO_2 양과 유사하게 대수층 내에서 CO_2 플룸 이동에 따라 가스 형태로 공극에 갇힌 CO_2의 양 역시 3개의 군집 모두에서 점점 늘어나고 있는 양상을 보여준다. Fig. 4.8은 각각의 인자에 대해 군집별로 민감도를 막대그래프로 그린 것이다. 적어도 하나의 군집에서 7개의 인자가 기준선 1을 넘는 것으로 확인되었기 때문에 공극에 트랩된 형태로 갇힌 CO_2 양에 대해서는 7개의 민감한 인자가 존재한다.

FWCD와는 달리 FGCDI가 모델의 반응인 경우 염도는 여전히 가장 민감한 인자이나 두 번째로 민감한 인자는 CO_2의 상대유체투과율 최댓값이 아닌 최소 임계 모세관압이다. 한편, 잔류 물포화도, 잔류 가스포화도, 수직수평 유체투과율 비와 같은 인자는 FWCD에 대하여서는 민감한 인자가 아니었으나 FGCDI에는 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 한편, Fig. 4.10과 Fig. 4.11은 FGCDI에 민감한 인자로 나타난 최소 임계 모세관압과 잔류 물포화도에 대해 군집별로 누적확률분포를 그린 것이다. FGCDI가 높은 군집의 경우 최소 임계 모세관압이 높은 양상을 보이며 반대로 FGCDI가 낮은 경우 최소임계 모세관압이 낮은 양상을 보인다. 잔류 물포화도의 경우 최소 임계 모세관압의 경우와는 반대로 FGCDI가 높은 군집에 대하여 잔류 물포화도가 낮은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.11은 FGCDI에 대한 인자들의 상호관계를 버블 플롯으로 도시한 것이다. 수직수평 유체투과율 비의 경우 모델의 반응에 대한 직접적인 민감도는 Fig. 4.6과 비교해 커진 원의 크기를 고려하면 증가하였다고 할 수 있지만 여전히 다른 인자들과의 상호작용은 적은 것으로 보인다. 반면, 잔류 물포화도와 잔류 가스포화도는 서로 깊은 영향을 주고 있으며 최소 임계 모세관압과 EF2의 단층투과율, 염도와 EF2의 단층투과율이 상호 연관이 있는 것으로 드러났다.

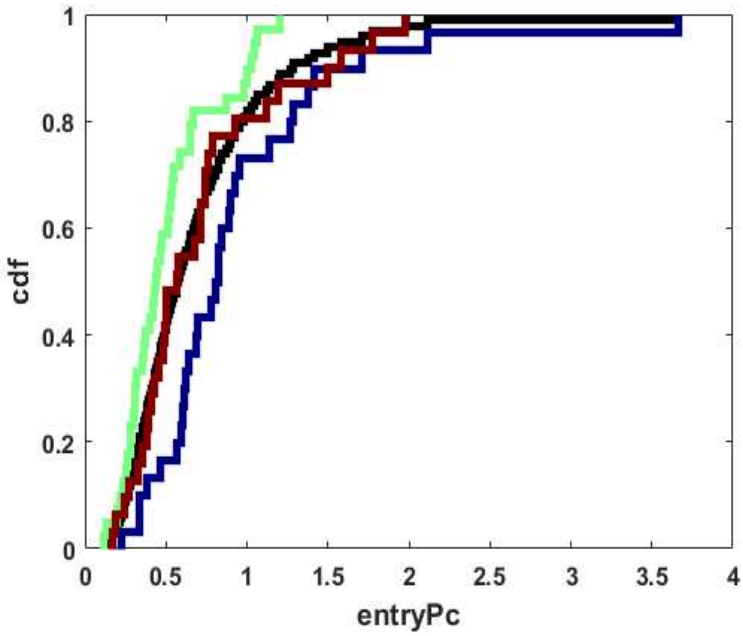


Figure 4.10 Entry Pc CDF by cluster and prior distribution for FGCDI

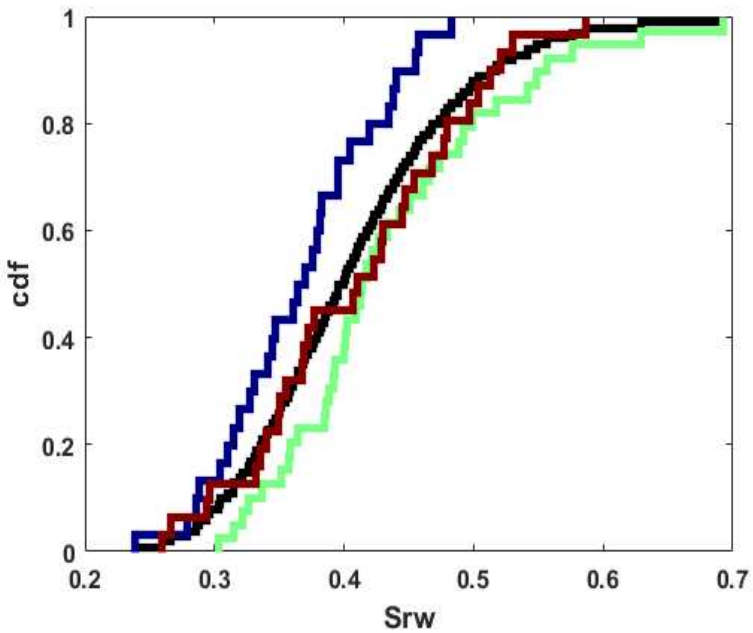


Figure 4.11 S_{rw} CDF by cluster and prior distribution for FGCDI

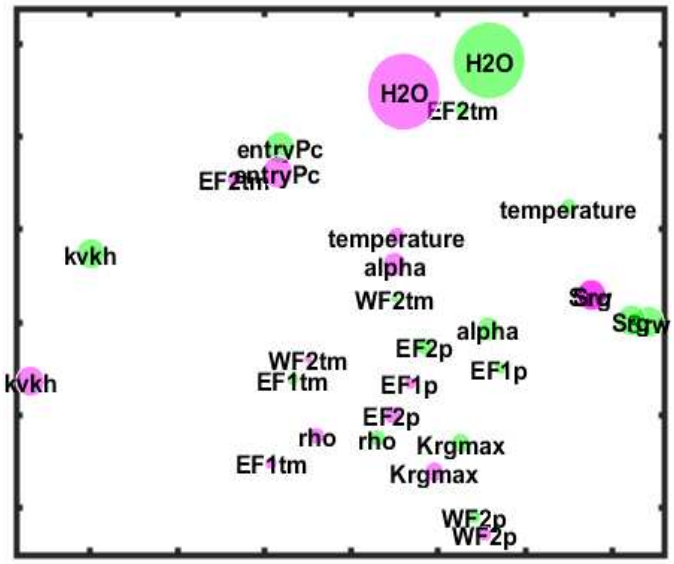


Figure 4.11 Bubble plot of parameters interaction for FGCDI

4.2 주입유량 40 ton/day

4.1과 동일한 방법과 모델에 대하여 주입유량을 2배로 늘려 민감도분석을 하였다. 프로젝트 실증을 위한 실제 일일주입량은 20 ton 이지만 대수층의 크기를 고려했을 때, 이는 다소 적은 주입량이라고 평가되었다. 또한, 주입량이 적어 최대 주입 공저압을 설정했음에도 불구하고 4.1에서는 대부분의 모델에서 주입정 제 1운영 조건인 주입유량으로도 주입이 가능했다. 이에 주입량을 2배로 하였을 때, 인자들의 민감도에 변화가 있는지 조사하며, 추가적으로 WBHP를 모델의 반응으로도 사용하여 이에 대한 민감도를 분석하고자 한다.

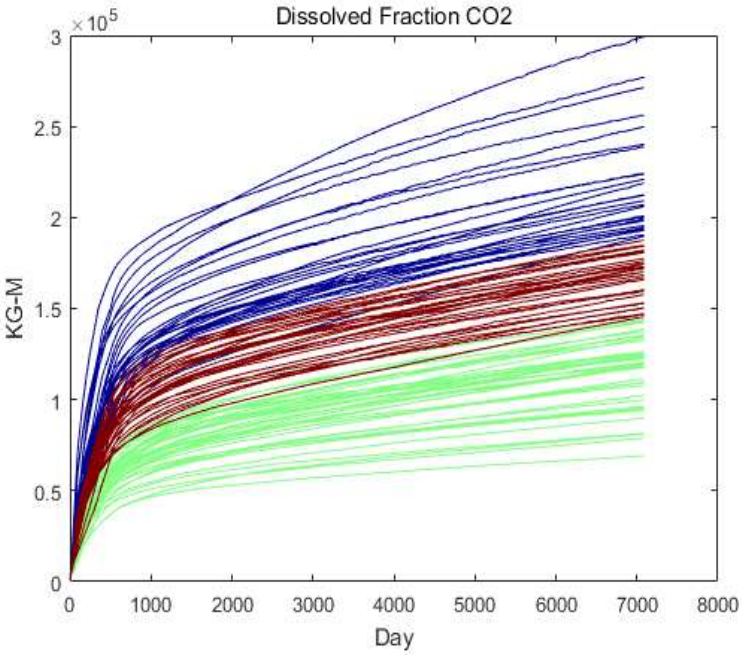


Figure 4.12 Clustering result of 100 models by FWCD

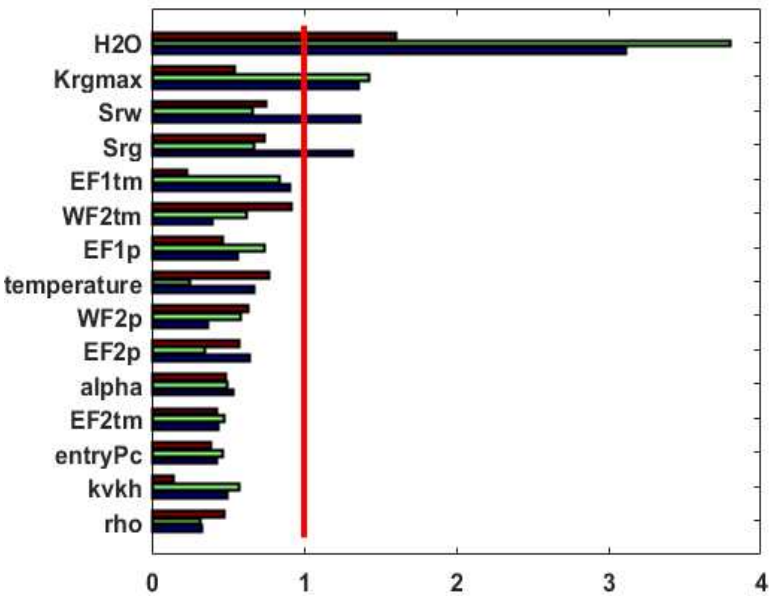


Figure 4.13 Parameter sensitivity for FWCD by cluster

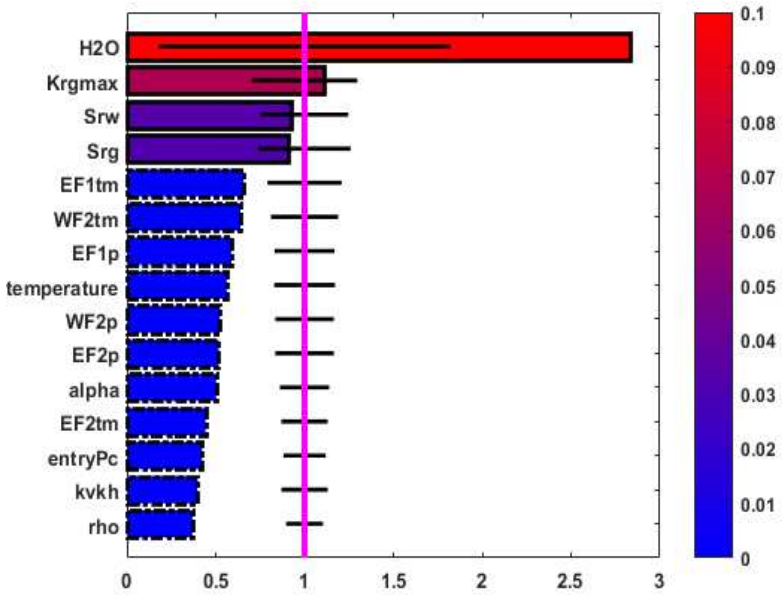


Figure 4.14 Standardized sensitivity for FWCD

Table 4.3 Standardized sensitivity for FWCD

Parameter	Standardized sensitivity
Salinity (ppm)	2.8883
Krgmax	1.1034
S_{rw}	0.9264
S_{rg}	0.9183
EF1tm	0.6687
WF2tm	0.6524
EF1p (MPa)	0.6119
temperature (℃)	0.5588
WF2p (MPa)	0.5275
EF2p (MPa)	0.5147
alpha	0.5040
EF2tm	0.4364
entryPc (MPa)	0.4262
kvkh	0.3955
rho	0.3745

Fig. 4.12는 주입유량을 2배로 늘린 후 시뮬레이션을 수행한 결과, 100개의 모델에 대하여 물에 용해된 CO_2의 양을 보여주는 그래프이다. 일일 주입유량이 20ton 이었던 4.1의 경우와 비교할 때, Fig. 4.13과 Fig. 4.14를 통해 잔류 물포화도와 잔류 가스포화도가 민감한 인자로 새롭게 분류되어 이 두 가지 인자를 포함한 총 4개의 인자가 FWCD에 민감한 인자로 분류되었다.

FWCD에 대한 각 군집에서의 염도, 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값의 누적확률분포를 살펴보면 그 양상이 4.1과 유사하다. Fig. 4.15 와 Fig. 4.16은 각각 잔류 물포화도와 잔류 가스포화도에 대한 누적확률 분포이다. FWCD가 높은 군집의 경우 잔류 물포화도가 높고 잔류 가스포화도가 낮은 특징을 보이고 있으며 반대로 FWCD가 낮은 군집의 경우 잔류 물포화도가 낮고 잔류 가스포화도가 높은 모습을 보인다. 인자들 간의 상호작용을 나타낸 Fig. 4.17의 버블 플롯은 4.1에서의 버블 플롯과 그 양상이 유사함을 알 수 있다.

Fig. 4.18은 주입유량을 2배로 늘린 후 시뮬레이션을 수행한 결과, 100개의 모델에 대한 가스 상태로 공극에 갇힌 CO_2의 양을 보여주는 그래프이다. 일일 주입량이 20ton 이었을 때와 비교하면 상위 네 종류의 인자 (염도, 최소 임계 모세관압, 잔류 물포화도, 잔류 가스포화도)를 제외하면 수직수평유체투과율 비, 상대유체투과율 곡선 인자 2가지가 빠지고 온도, 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값이 새롭게 추가되었다. 한편, 상위 네 종류의 인자는 여전히 “Critical”한 인자로 분류되고 있다.

4.1 에서와 유사하게 Fig. 4.21과 4.22에서 FGCDI가 높은 군집의 경우 최소 임계 모세관압이 높은 양상을 보이며 반대로 FGCDI가 낮은 경우 최소임계 모세관압이 낮은 양상을 보인다. 이산화탄소 상대유체투과율 최댓값의 경우에는 모세관압과 반대의 관계로 이산화탄소 상대유체투과율 최댓값이 클 때, FGCDI가 작아진다.

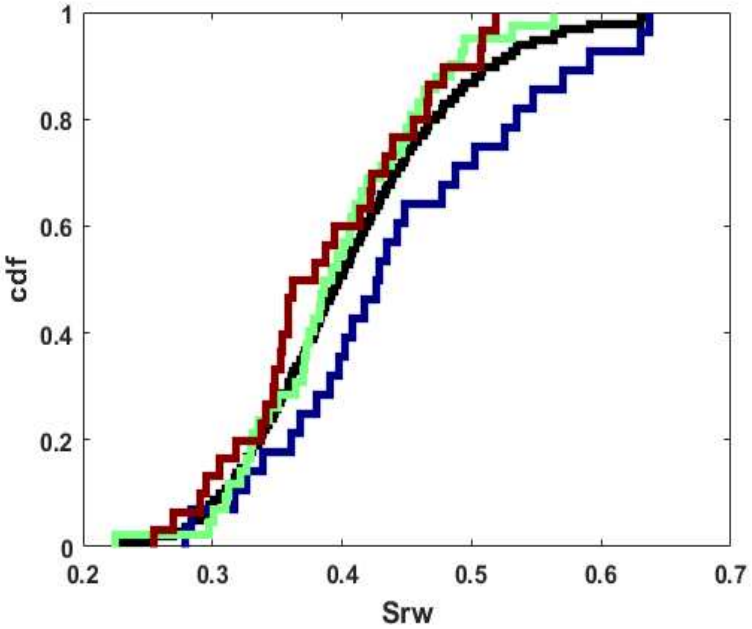


Figure 4.15 S_{rw} CDF by cluster and prior distribution for FWCD

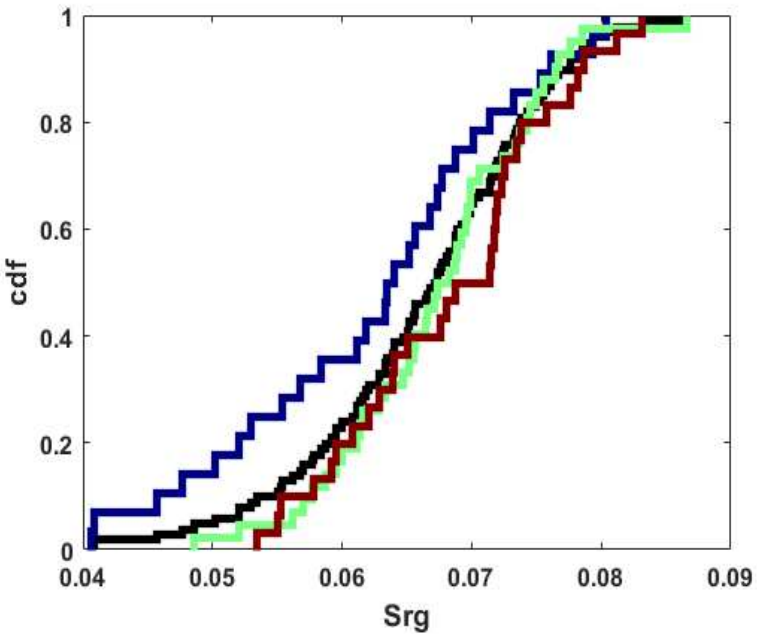


Figure 4.16 S_{rg} CDF by cluster and prior distribution for FWCD

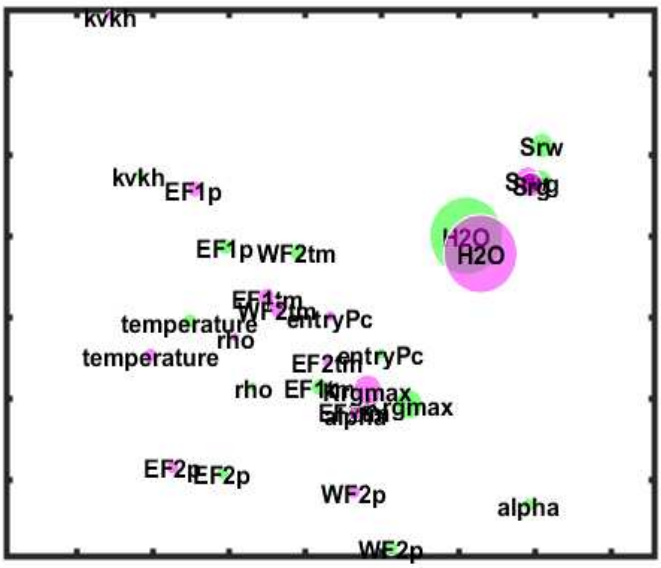


Figure 4.17 Bubble plot of parameters interaction for FWCD

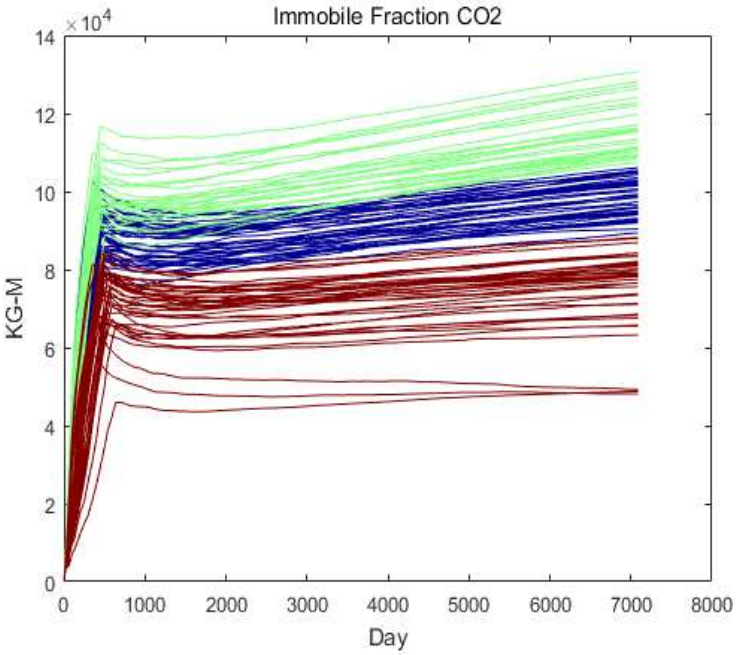


Figure 4.18 Clustering result of 100 models by FGCDI

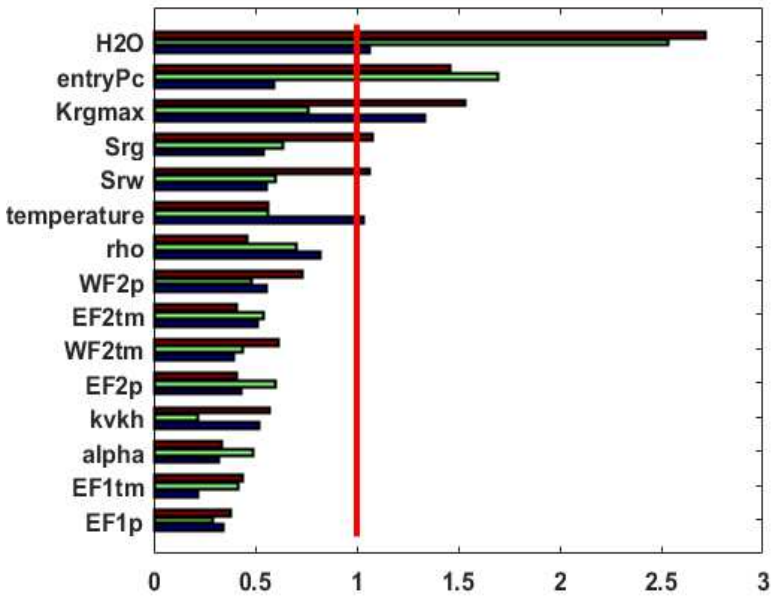


Figure 4.19 Parameter sensitivity for FGCDI by cluster

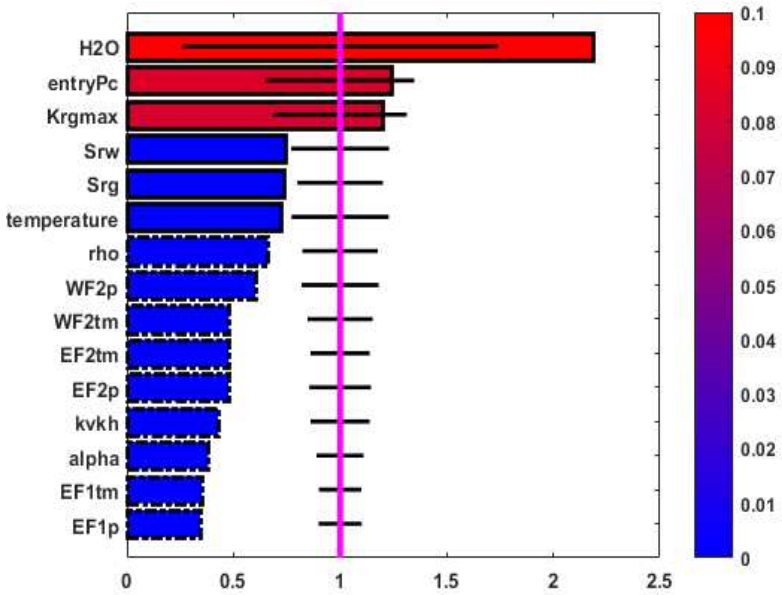


Figure 4.20 Standardized sensitivity for FGCDI

Table 4.4 Standardized sensitivity for FGCDI

Parameter	Standardized sensitivity
Salinity (ppm)	2.1015
entryPc (MPa)	1.2463
Krgmax	1.2051
S_{rw}	0.7466
S_{rg}	0.7366
temperature (℃)	0.7143
rho	0.6589
WF2p (MPa)	0.5876
WF2tm	0.4835
EF2tm	0.4765
EF2p (MPa)	0.4750
kvkh	0.4298
alpha	0.3770
EF1tm	0.3529
EF1p (MPa)	0.3347

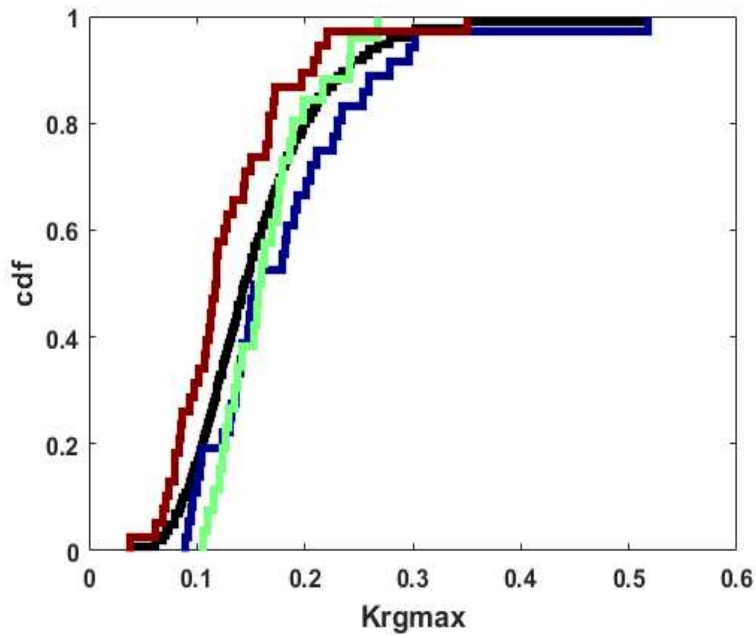


Figure 4.21 Krgmax CDF by cluster and prior distribution for FGCDI

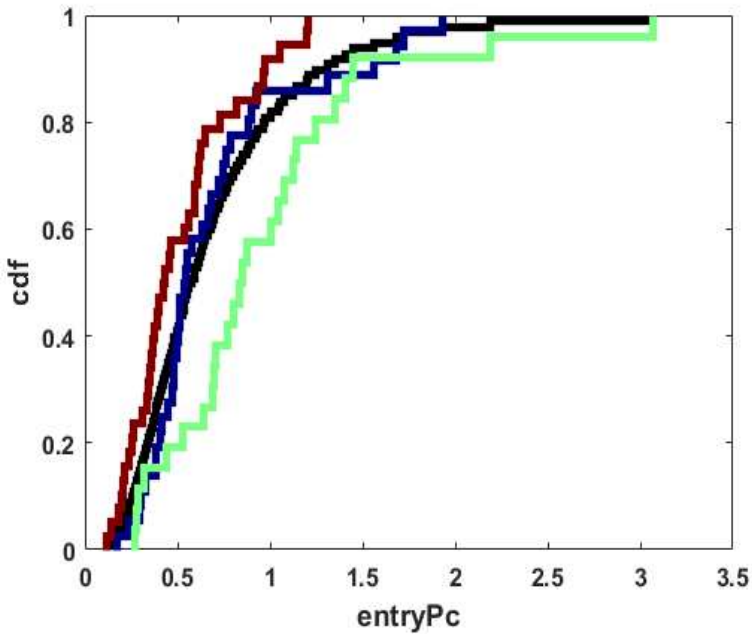


Figure 4.22 Entry Pc CDF by cluster and prior distribution for FGCDI

다음으로, 주입정에서의 공저압을 모델의 반응으로 사용하여 민감도를 분석하였다. 설정한 주입기간에 대해 주입이 끝나면 주입정은 폐쇄되어 공저압이 더 이상 측정되지 않으므로 주입이 시작된 시점을 기준으로 총 주입기간의 절반에 해당하는 250일 동안의 압력자료를 모두 각 모델의 반응으로 사용하였다. Fig. 4.23은 초기 250일 동안의 각 모델별 WBHP 자료를 도시한 것이다. 모든 모델에서 CO_2가 주입됨에 따라 초기에 급격하게 압력이 증가하는 현상을 보인다. 이는 기존에 공극에 채워져 있는 물을 대체하기 위해서는 공극으로 들어가기 위한 임계압력이 필요한데 이 과정에서 급격한 압력증가현상이 발생하기 때문이다. 이후 점차 CO_2가 염수를 밀어내면서 모세관대를 형성하고, CO_2 유동이 용이해져 압력이 감소하는 현상을 보인다.

Fig. 4.24와 Fig. 4.25를 보면 초기 주입정 공저압의 양상을 결정하는 중요한 인자는 염도와 CO_2의 상대유체투과율 최댓값임을 확인할 수 있다. 주입정의 압력 상승이 적게 나타나는 군집은 이산화탄소 상대유체투과율 최댓값이 상대적으로 높으며, 염도의 경우에는 물의 비율이 높은, 즉, 염도가 낮은 군집에 대해 압력상승이 적게 나타난다. FWCD, FGCDI와 비교했을 때, 민감한 인자로 분류된 인자의 수가 2개로 상대적으로 적으며 이산화탄소 상대유체투과율 최댓값의 경우 표준화된 민감도는 증가하였다.

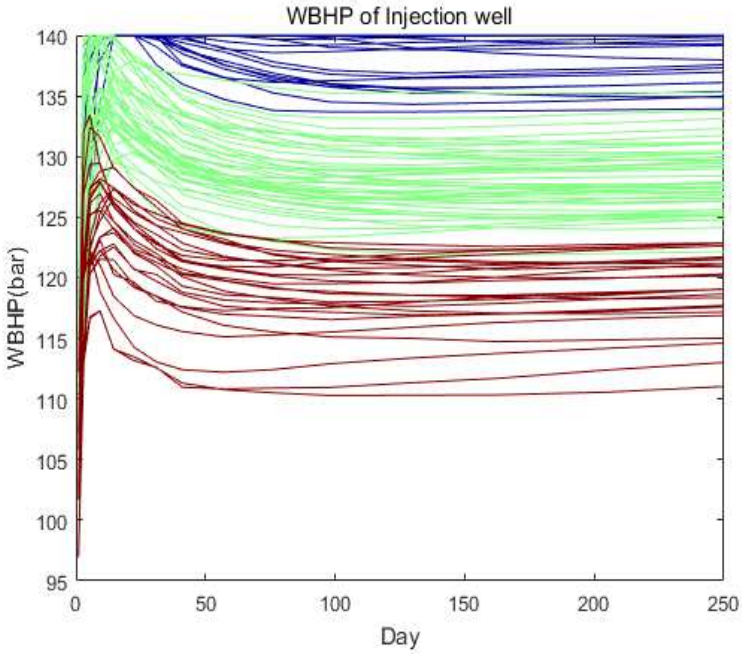


Figure 4.23 Clustering result of 100 models by WBHP

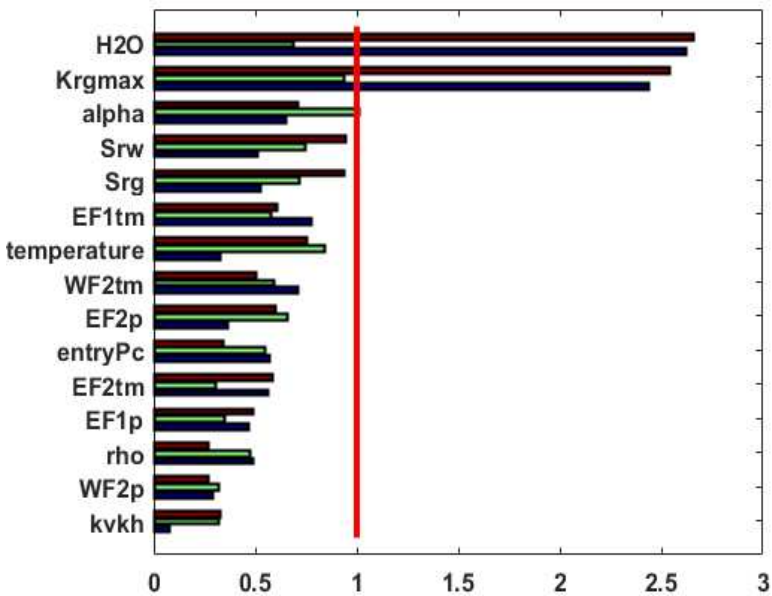


Figure 4.24 Parameter sensitivity for WBHP by cluster

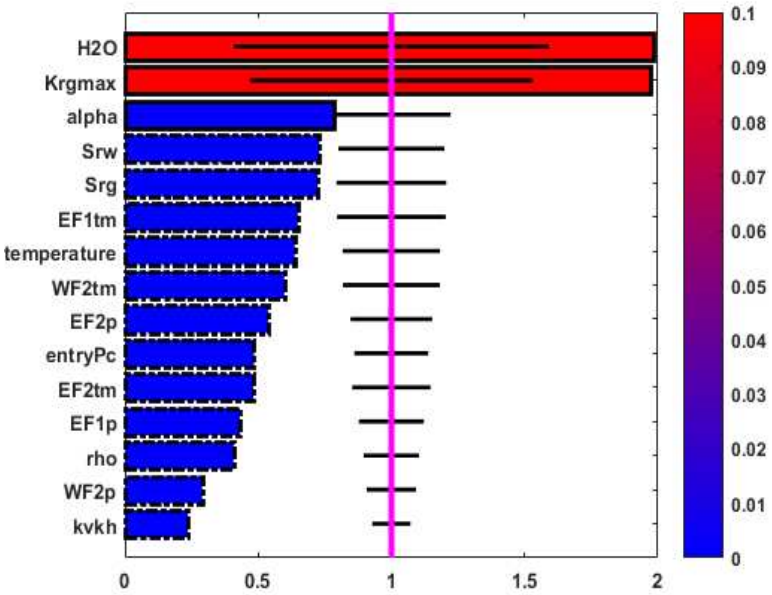


Figure 4.25 Standardized sensitivity for WBHP

Table 4.5 Standardized sensitivity for WBHP

Parameter	Standardized sensitivity
Salinity (ppm)	1.9856
Krgmax	1.9692
alpha	0.7859
S_{rw}	0.7297
S_{rg}	0.7233
EF1tm	0.6486
temperature (℃)	0.6370
WF2tm	0.5982
EF2p (MPa)	0.5370
entryPc (MPa)	0.4844
EF2tm	0.4817
EF1p (MPa)	0.4316
rho	0.4074
EF2p (MPa)	0.2896
kvkh	0.2365

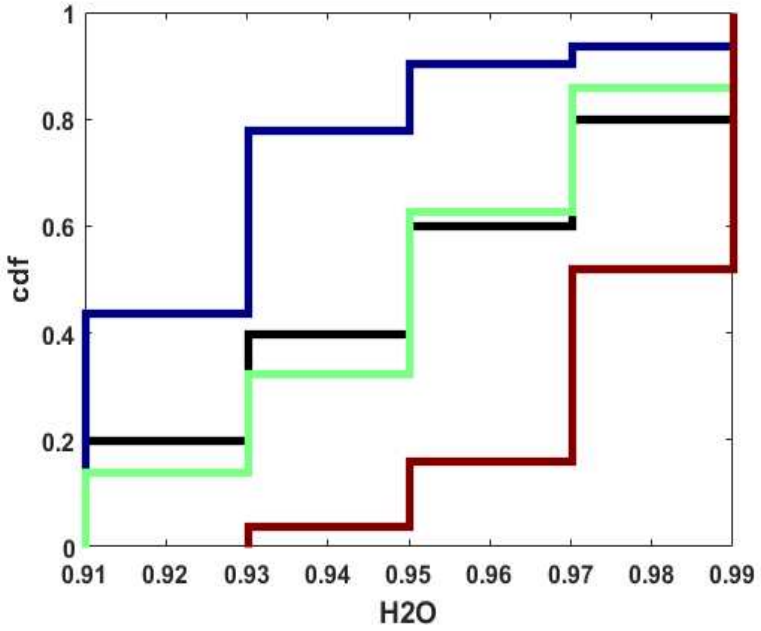


Figure 4.26 Salinity CDF by cluster and prior distribution for WBHP

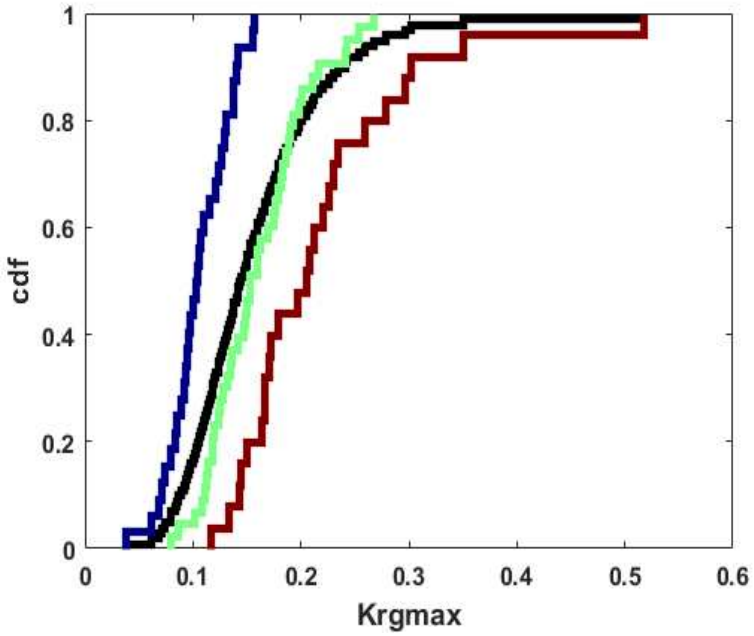


Figure 4.27 Krgmax CDF by cluster and prior distribution for WBHP

4.3 민감도분석 결과 해석

4.3에서는 4.1과 4.2에서 DGSA 수행 결과 민감하다고 분류된 인자들의 실제 영향을 파악하고 그 원인을 분석하고자 한다. 각각의 주입량에 따른 민감도분석 결과 염수 내 이산화탄소의 용해량 및 공극 속에 갇히는 이산화탄소의 양에 가장 영향을 많이 끼치며, 두 가지 경우에 모두 민감한 인자인 염도, 이산화탄소 상대유체투과율 최댓값, 잔류 물포화도, 잔류 가스포화도, 최소 임계 모세관압의 영향을 중점적으로 기술하고자 한다. 또한, 이산화탄소의 용해량에 있어서 인자들 간의 상호관계가 가장 크게 발생한 잔류 물포화도와 잔류 가스포화도와의 관계를 기술하고자 한다.

(1) 염도

민감도분석 결과 염도는 물에 녹은 형태로 저장되는 이산화탄소 양과 공극 속에 갇힌 이산화탄소의 양에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 분석되었다. 주입량이 각각 20, 40 ton/day 일 때, 3개의 군집 중 이산화탄소의 용해량이 가장 큰 군집에서 물의 몰 비율이 높은 결과를 나타내었다. 즉, 염도가 낮은 경우 이산화탄소의 용해량이 많았고 염도가 높은 경우 이산화탄소의 용해량이 적음을 의미한다. 염수층에 초임계상태의 이산화탄소가 주입되면 아래 식과 같은 화학반응이 발생한다.

$$\begin{aligned} &CO_2(g) \leftrightarrow CO_2(aq) \\ &CO_2(aq) + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \\ &H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \\ &HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-} \end{aligned} \tag{4.1}$$

주입된 이산화탄소는 주로 물속에서 탄산염을 형성한다. 탄산염의 형태는 염수의 산성도에 따라 달라지는데, 약산성을 띠는 염수의 경우

H_2CO_3가 대다수이며 중성의 경우 HCO_3^- 가 많이 존재한다. 하지만 이 과정에서 염도가 높아 Na+, Cl- Ca2+, Cl- 와 같은 전해질이 많이 존재한다면 물 입자들은 이러한 전해질 이온에 흡착된다. 따라서 염도가 낮은 경우와 비교하였을 때 상대적으로 이산화탄소를 용해시킬 수 있는 H^+, O^{2-} 이온이 부족하게 되며 이에 따라 이산화탄소의 용해량이 감소한다. 이를 염석효과(Salting out effect)라고 하며 Fig. 4.27과 같이 나타난다. 한편, 염도는 이산화탄소의 용해량과의 상관관계가 큼에도 불구하고 공극 속에 갇힌 이산화탄소의 양에 대해서 민감하게 판단된 것은 두 시뮬레이션 결과값이 서로 독립적인 관계가 아니기 때문이다. 즉, 이산화탄소의 용해량에 염도가 가장 민감하게 반응하기 때문에, 총 주입량에서 이산화탄소의 용해량을 뺀 값인 공극 속에 갇히는 이산화탄소의 양이 줄어든 것이다.

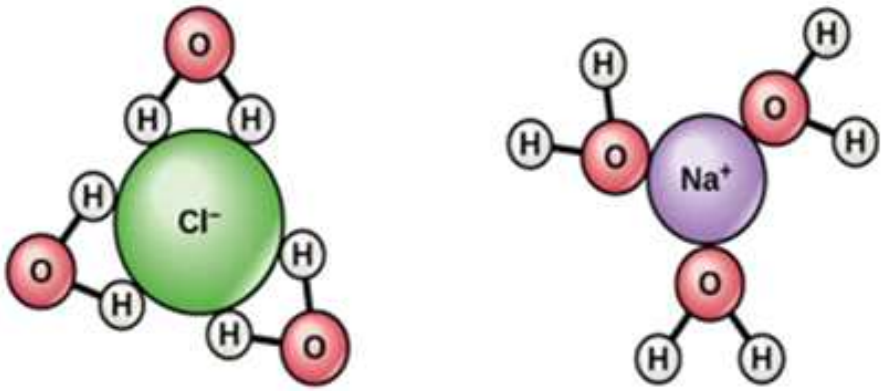


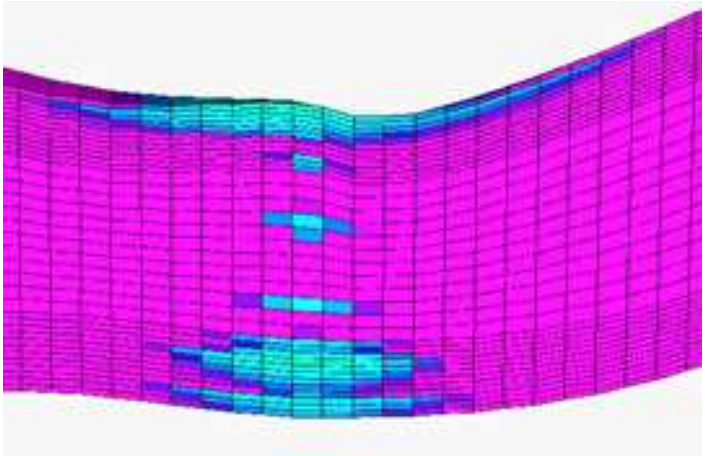
Figure 4.28 Salting out effect (Gorgenyi et al., 2006)

(2) 잔류 물포화도

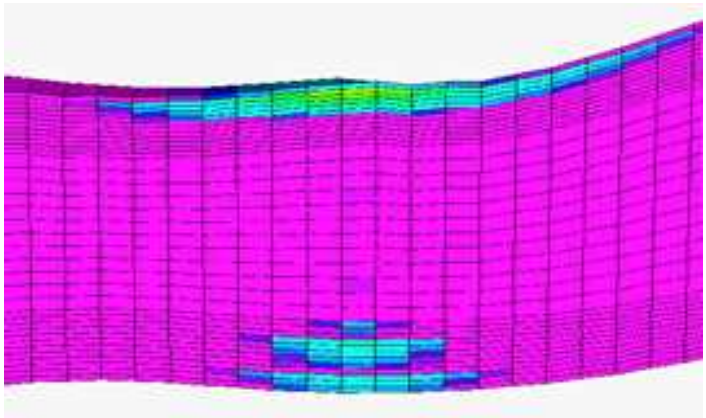
잔류 물포화도는 이산화탄소의 이동형태에 큰 영향을 끼친다. 잔류 물포화도가 높은 경우 이산화탄소 플룸을 수직방향이 아닌 측면방향으로 유동하게끔 유도하여 염수와의 접촉면적을 넓히고, 이로 인해 염수에 용해될 수 있는 이산화탄소의 양을 늘리는 것으로 확인되었다. 즉, 이산화탄소의 용해량이 높은 군집에서 잔류 물포화도가 크게 나타났고 반대로 용해량이 낮은 군집에서 잔류 물포화도가 작게 나타났다. Fig. 4.28은 각각 잔류 물포화도가 0.4873, 0.3953인 앙상블 11번과 12번의 주입정 근처에서 가스포화도를 보여주고 있는데 잔류 물포화도가 상대적으로 큰 11번 앙상블이 12번 앙상블보다 측면방향으로 더 균일하게 가스가 퍼져있는 것을 확인할 수 있다.

(3) 잔류 가스포화도

잔류 가스포화도 역시 이산화탄소의 이동양상과 큰 관련이 있다. 잔류 물포화도와 비교했을 때 미치는 영향은 유사하지만 값은 반대이다. 즉,이산화탄소의 용해량이 큰 군집에서 잔류 가스포화도는 작은 값을 보이고 있으며 반대로 용해량이 작은 군집에서는 잔류 가스포화도가 큰 값을 보인다. Fig. 4.29는 각각 잔류 가스포화도가 0.0866, 0.0486인 앙상블 6번과 19번의 주입정 근처에서의 가스포화도를 보여준다. 잔류 가스포화도가 상대적으로 작은 앙상블 19번에서 6번보다 측면방향으로 더 멀리 퍼져있는 것을 확인할 수 있다.

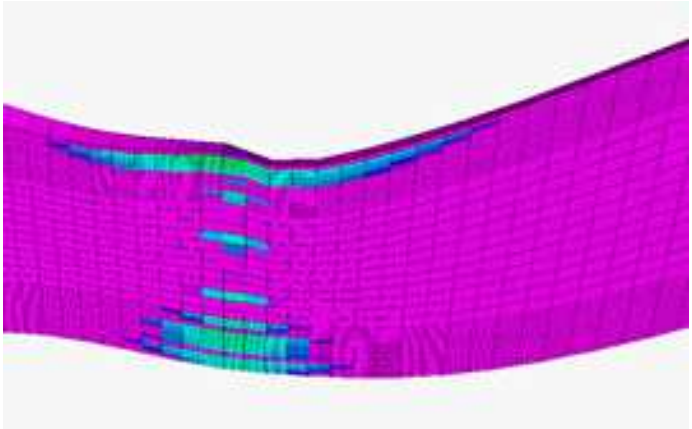


(a) Model #11, S_{rw} = 0.4873

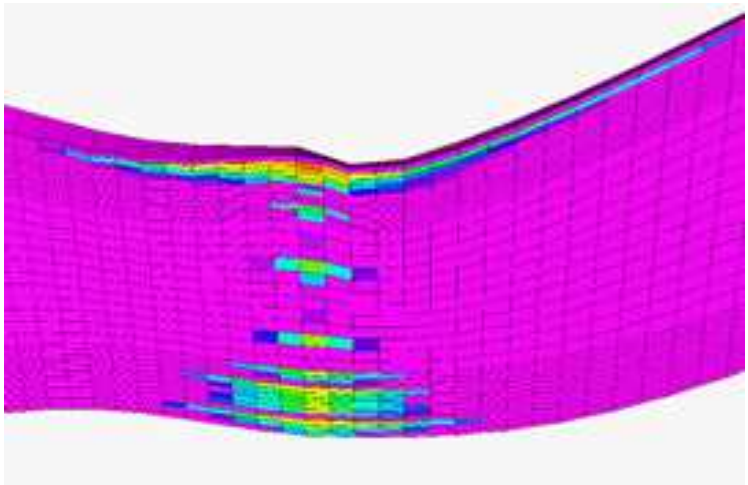


(b) Model #12, S_{rw} = 0.3953

Figure 4.29 Gas saturation distribution for different S_{rw}



(a) Model #6, S_{rg} = 0.0866



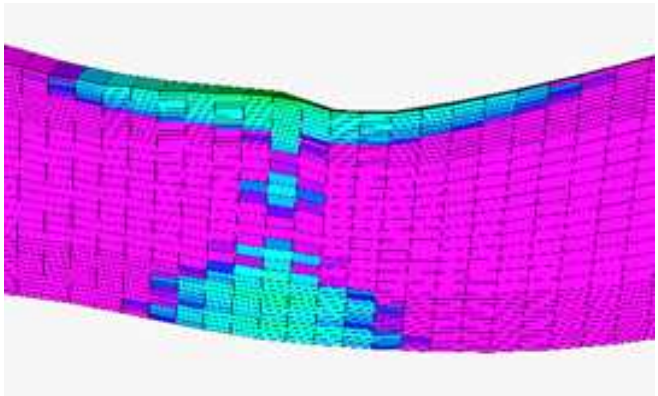
(b) Model #19 S_{rg} = 0.0486

Figure 4.30 Gas saturation distribution for different S_{rg}

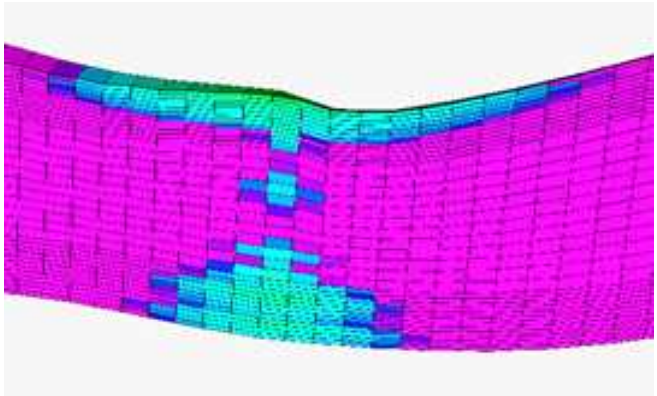
(4) 최소 임계 모세관압

염수로 공극이 단상 포화되어 있는 대수층의 경우 이산화탄소를 주입하게 되면 초기에 급격한 압력 상승이 일어난다. 이산화탄소가 염수를 밀어내고 공극 내로 침투하기 위해서는 임계압력이 필요한데 이 임계압력에 도달하는 과정까지 주입정 근처에서 압력이 급격하게 증가하는 것이다. 이후 임계압력에 도달하여 공극내로 침투하게 되면 모세관대를 형성하여 상대적으로 염수를 밀어내는 것이 더욱 쉬워진다. 이에 따라 염수보다 점성이 작은 이산화탄소의 유동이 더 촉진되며 이에 따라 압력이 감소한다. 즉, 이산화탄소-물 2상 유동에서 최소 임계 모세관압은 다공질 매체 내부로 이산화탄소가 침투하기 위한 최소 압력으로 정의된다.

한편, 최소 임계 모세관압 역시 이산화탄소의 수직이동 및 수평이동과 큰 관련이 있다. 공극 내 가스형태로 갇힌 이산화탄소의 양이 많은 군집에서는 높은 최소 임계 모세관압이 관찰되며 반대로 낮은 군집에서는 최소 임계 모세관압이 낮다. 이는 임계 모세관압이 높을수록 이산화탄소가 수직방향보다 수평방향을 선호하여 유동하기 때문에 이 과정에서 넓게 퍼져나가며 공극 속에 갇힐 수 있는 이산화탄소의 양이 증가하는 것이다. Fig. 4.30은 최소 임계 모세관압이 2.61 MPa인 5번 앙상블과 최소 임계 모세관압이 0.16 MPa인 4번 앙상블의 이산화탄소 분포양상을 보여준다. 4번 앙상블에 비해 5번 앙상블에서 이산화탄소가 각 층에서 더 측면으로 넓게 퍼져 있고 상대적으로 더 균일한 분포를 띠고 있음을 알 수 있다. 반면 4번 앙상블에서는 수직유동으로 인해 주입정 근처의 가스포화도가 5번 보다 높다.



(a) Model #5, Entry Pc = 2.61 MPa



(b) Model #4, Entry Pc = 0.16 MPa

Figure 4.31 Gas saturation distribution for different Entry Pc

(5) 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값

이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값은 잔류 물포화도, 잔류 가스포화도, 최소 임계 모세관압과 함께 이산화탄소 플룸의 이동양상에 영향을 미칠 뿐만 아니라 주입정에서의 압력 증가에도 큰 연관이 있다. 이산화탄소의 용해량이 많은 군집에서 상대유체투과율 최댓값이 대체적으로 크게 나타났으며 주입정에서의 압력 증가가 작은 군집일수록 상대유체투과율 최댓값이 크게 나타났다. 이는 상대유체투과율의 최댓값이 높아지면 유동의 용이도가 상대적으로 증가하여 대수층 내부로 빨리 퍼지는 양상을 보이기 때문이며, 이 과정에서 염수와의 접촉면적도 향상되기 때문에 이에 용해량도 증가한 것으로 분석되었다.

(6) 잔류 물포화도, 잔류 가스포화도의 상호 영향

Fig. 4.31은 이산화탄소의 용해량에 영향을 미치는 인자들의 상호관계를 도시한 버블 플롯(Bubble Plot) 이다. 버블의 크기는 민감도의 크기를 상대적으로 도시한 것이며 버블 사이의 거리는 인자 간 영향을 주고받는 정도를 나타낸다. 한편, 초록색 버블은 다른 인자들로부터 영향을 받는 경우를 의미하여, 분홍색 버블은 다른 인자들에게 영향을 주는 경우를 의미한다. 본 연구에서는 상호 관계가 가장 밀접하게 형성된 잔류 물포화도와 잔류 가스포화도의 관계에 대해 살펴본다.

Fig. 4.32는 4.2의 분석 결과로 도출 된 이산화탄소 용해량을 군집화한 후 각각의 군집을 잔류가스포화도에 대해 누적확률분포를 도시한 것이다. 용해량이 가장 많은 파란색 군집 내에서 잔류 물포화도의 변화에 따른 잔류 가스포화도는 Fig. 4.33과 같다. Fig. 4.33을 살펴보면 잔류 물포화도의 구간 크기에 따른 잔류 가스포화도가 용해량에 미치는 영향이 매우 다름을 누적확률분포의 양상을 통해 알 수 있다. 파란색 군집 내에서 잔류 물포화도가 낮은 경우 잔류 가스포화도는 높고 잔류 물포화도가 높은 경우 잔류 가스포화도는 낮게 형성되어 있다.

즉, Fig. 4.33은 잔류 가스포화도와 잔류 물포화도는 높은 상관관계에 놓여 있다는 것을 의미하는데 앞선 민감도 분석 결과와 종합하면 높은 잔류 물포화도 및 낮은 잔류 가스포화도가 조합되는 경우 이산화탄소의 용해량은 더 높게 나타날 것이라고 예측할 수 있다.

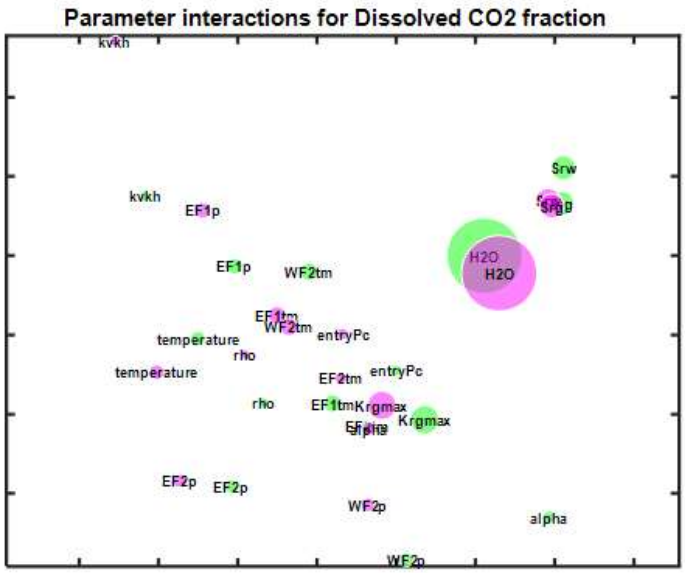


Figure 4.32 Bubble plot for parameter interactions of dissolved fraction of CO_2 in water

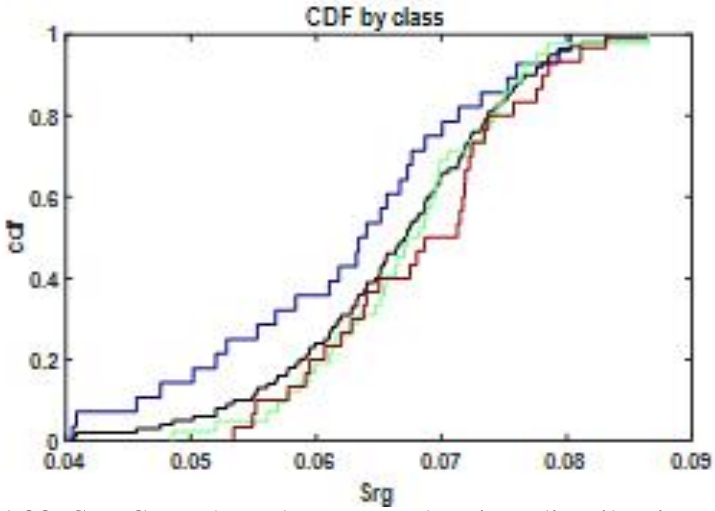


Figure 4.33 S_{rg} CDF by cluster and prior distribution of S_{rg}

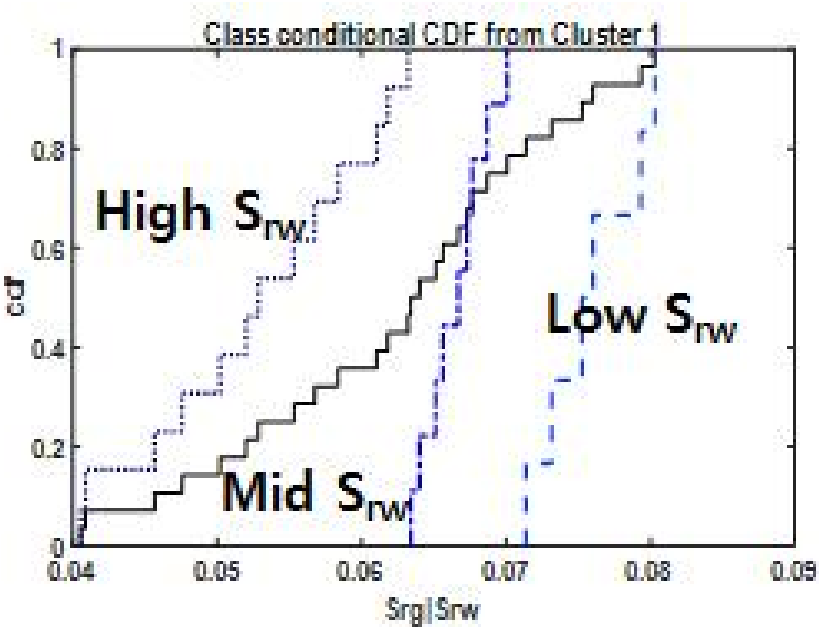


Figure 4.34 Conditional Effects of Srw for S_{rg}

제 5 장 결론

본 연구에서는 포항 영일만 CCS 프로젝트 대상 지질모델을 바탕으로 이산화탄소 지중저장 안정성에 대한 민감도를 분석하였다. 기존의 연구들은 인자들의 민감도를 수치로 정량화 하지 못하였고, 실제 인자들의 값의 범위를 반영하지 못하였다. 하지만 본 연구에서는 참고문헌과 기존 연구를 바탕으로 실제 가능한 인자들의 분포값을 사용하였으며 각 인자들의 민감도를 수치로 제시하였다. 이를 위해 본 연구는 누적확률분포 간의 거리를 활용하는 민감도분석 기법인 DGSA를 활용하였다.

대수층 시뮬레이션의 입력자료의 인자집합을 일관성 있게 추출하기 위해 라틴 하이퍼큐브 샘플링 방법을 결합하였고, 시뮬레이션 결과값의 군집화를 위해 K-medoids 군집화 기법을 적용하였다. 3차원 포항 영일만 지질모델에 관한 민감도분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시뮬레이션 결과값을 물에 용해된 이산화탄소의 양, 공극에 가스 형태로 갇힌 이산화탄소의 양, 주입정에서의 공저압력을 사용하였을 때 이에 민감한 인자들은 크게 5가지로 염도, 잔류 물포화도, 잔류 가스 포화도, 최소 임계 모세관압, 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값이다.

2. 염도는 이산화탄소의 용해량에 절대적으로 영향을 미치는 인자로서, 높은 염도의 경우 이산화탄소의 용해량이 감소하며 낮은 염도의 경우 이산화탄소의 용해량이 증가한다. 이는 “염석효과”로 대수층 내 염도가 높아 다양한 전해질 이온들이 존재하면 물 입자와 이온들 간의 인력이 발생하여 상대적으로 이산화탄소를 용해할 수 있는 물 입자가 줄어든다.

3. 잔류 물포화도와 잔류 가스포화도는 이산화탄소의 이동양상에 크게 관여한다. 잔류 가스포화도가 낮은 경우 이산화탄소의 용해량이 크게 나타나며 반대로 잔류 물포화도가 높은 경우에 이산화탄소의 용해량이 높은 양상을 보인다. 이는 잔류 가스포화도가 낮거나, 잔류 물포화도가 높은 경우 이산화탄소 플룸이 수직방향보다 상대적으로 수평방향을 선호하여 이동하며 이에 따라 염수와의 접촉면적이 넓어져 이산화탄소의 용해량이 증가하는 것이다. 또한, 인자들 간의 상호작용을 분석한 결과, 잔류 가스포화도와 잔류 물포화도와의 관계가 가장 큰 것으로 나타났는데 이는 두 인자 모두 물-이산화탄소의 상대유체투과율 곡선을 구성하는 인자일 뿐만 아니라 두 인자 모두 이산화탄소의 이동양상에 유사한 영향을 미치기 때문이다.

4. 최소 임계 모세관압 역시 이산화탄소의 이동양상에 크게 관여한다. 그 값이 크면 이산화탄소의 이동이 수직보다는 수평방향으로 이루어지기 때문에 상대적으로 이산화탄소가 공극 내에 침투할 수 있는 확률이 높아지고, 이에 따라 공극 내에 가스가 많이 갇힌 형태로 존재할 수 있다.

5. 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값은 유동의 용이도를 결정하는 인자이다. 특히 주입정에서의 압력증가에 큰 영향을 미치며, 잔류 물포화도 및 잔류 가스포화도와 함께 접촉면적 및 속도에 영향을 주기 때문에 이산화탄소의 용해량이 높은 군집에서 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값이 높게 나타났으며, 또한 주입정에서의 압력 증가가 작게 나타난 군집에서 이산화탄소의 상대유체투과율 최댓값이 높게 나타났다.

본 연구는 인자집합을 분포로서 구성하여 100개의 모델에 대한 시뮬레

이션 및 민감도분석을 수행하였기 때문에 모델의 불확실성 폭을 적절하게 제시하였다. 모델 결과에 가장 크게 불확실성에 미치는 인자들은 이에 대한 추가적인 연구 및 히스토리 매칭, 주입정 well-test 등을 통해 모델을 좀 더 정교하게 교정할 수 있으며 궁극적으로는 이산화탄소 저장 안정성, 이산화탄소 총 저장용량 평가 등에 활용될 수 있다.

참고문헌

최종근. 2013. 지구통계학. 시그마프레스, 서울.

최종근. 2010. 수치해석. 텍스트북스, 서울.

Ampomah W., Balch R., & Grigg R. 2015. Analysis of Upscaling Algorithms in Heterogeneous Reservoirs with Different Recovery Processes. SPE Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, 1-5 March 2015.

Bachu, S. 2013. Drainage and Imbibition CO2/Brine Relative Permeability Curves at in Situ Conditions for Sandstone Formations in Western Canada. Energy Procedia, 37: 4428-4436.

Bachu, S. 2015. Review of CO2 storage efficiency in deep saline aquifers. International Journal of Greenhouse Gas Control, 40: 188-202.

Benion, D., & Bachu, S. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution/capillary pressure character on CO2 relative permeability at reservoir conditions in CO2-brine systems. SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Okalahoma, USA, 22-26 April 2006.

Blunt, M. 2010. Carbon dioxide storage. Grantham Institute for Climate Change Briefing Paper 4.

Bryant, S., & Pope, G. 2008. Buoyancy-Dominated Multiphase Flow and Its Effect on Geological Sequestration of CO2. SPE Journal, 13, no. 4: 447-454.

Burnside, N., & Naylor, M. 2014. Review and implications of relative permeability of CO2/brine systems and residual trapping of CO2. International Journal of Greenhouse Gas Control, 23: 1-11.

Choi et al. 2015. Preliminary results of numerical simulation in a small-scale CO2 injection pilot site: 1. Prediction of CO2 plume migration. Journal of the Geological Society of Korea, 51, no. 5: 487-496

Choi et al. 2017. Simulation of CO 2 injection in a small-scale pilot site in the Pohang Basin, Korea: Effect of dissolution rate of chlorite on mineral trapping. International Journal of Greenhouse Gas Control, 59: 1-12.

Cooper, C. 2009. A technical basis for carbon dioxide storage. Energy Procedia, 1, no. 1: 1727-1733.

Davies, D., & Bouldin, D. 1979. A Cluster Separation Measure. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-1, no. 2: 224-227.

Doughty, C. 2008. Estimating plume Volume for Geologic Storage of CO2 in Saline Aquifers. Ground Water, 46, no. 6: 810-813.

Fenwick, D., Scheidt, C. & Caers, J. 2014. Quantifying Asymmetric Parameter Interactions in Sensitivity Analysis: Application to Reservoir Modeling. Mathematical Geosciences, 46, no. 4: 493-511.

González-Nicolás, et al. 2015. Stochastic and global sensitivity analyses of uncertain parameters affecting the safety of geological carbon storage in saline aquifers of the Michigan Basin. International Journal of Greenhouse Gas Control, 37: 99-114.

Gorgenyi et al. 2006. Aqueous salting-out effect of inorganic cations and anions on non-electrolytes. Chemosphere, 65: 802-810.

Hosseini et al. 2013. Static and dynamic reservoir modeling for geological CO2 sequestration at Cranfield, Mississippi, U.S.A. International Journal of Greenhouse Gas Control, 18: 449-462.

Hwang et al. 2016. Evaluation of CO2 storage capacity and injectivity using a relief well in a saline aquifer in Pohang basin, offshore South Korea. Geosciences Journal, 20, no. 2: 239-245.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2005. Carbon Dioxide Capature and Storage. Cambridge University Press, New York.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2011. Renewable Energy Sources and Climate change Mitigation. Cambridge University Press, New York.

Juanes, R., Spiteri, E., Orr, F. & Blunt, M. 2006. Impact of relative permeability hysteresis on geological CO2 storage. Water Resources Research, 42, no. 12.

Jung, Y., Zhou, Q. & Birkholzer, J. 2015. On the detection of leakage pathways in geological CO 2 storage systems using pressure monitoring data: Impact of model parameter uncertainties. Advances in Water Resources, 84: 112-124.

Lee et al. 2016. Regional CO2 solubility trapping potential of a deep saline aquifer in Pohang basin, Korea. Geosciences Journal, 20, no. 4: 561-568.

Lee et al. 2017. Fault reactivation potential of an offshore CO 2 storage site, Pohang Basin, South Korea. Journal of Petroleum Science and Engineering, 152: 427-442.

Leonenko, Y., & Keith, D. 2008. Reservoir Engineering To Accelerate the Dissolution of CO2Stored in Aquifers. Environmental Science & Technology, 42, no. 8: 2742-2747.

Li, B., Tchelepi, H. & Benson, S. 2013. The Influence of Capillary Entry-Pressure Representation on CO2 Solubility Trapping. Energy Procedia, 37: 3808-3815.

Mathias et al. 2013. On relative permeability data uncertainty and CO2 injectivity estimation for brine aquifers. International Journal of Greenhouse Gas Control, 12: 200-212.

Mckay, M., Beckman, R. & Conover, W. 1979. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. Technometrics, 21, no. 2: 239-245

Mo, S., & Akervol, I. SPE, SINTEF Petroleum Research 2005. Modeling Long-Term CO2 storage in Aquifer with a Black-oil Reservoir Simulator, SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, March, 7-9, 2005.

Park et al. 2016. DGSA: A Matlab toolbox for distance-based generalized sensitivity analysis of geoscientific computer experiments. Computers & Geosciences, 97: 15-29.

Pollyea, R. 2016. Influence of relative permeability on injection pressure and plume configuration during CO 2 injections in a mafic reservoir. International Journal of Greenhouse Gas Control, 46: 7-17.

Rousseeuw, P. 1986, Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics, 20: 53-65.

Sarkarfarshi et al. 2014. Parametric sensitivity analysis for CO2 geosequestration. International Journal of Greenhouse Gas Control, 23: 61-71.

Schulze et al. 2017. An optically pumped magnetometer working in the light-shift dispersed Mz mode, Sensors, 17, no. 3: 561

Song Y., & Lee T. 2015. Geothermal Development in the Republic of Korea: Country Update 2010-2014. World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

Spear, R., & Hornberger, G. 1980. Eutrophication in peel inlet-Ⅱ. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis. Water Research, 14: 43-49.

White et al. 2014. Numerical Simulation of Carbon Dioxide Injection in the Western Section of the Farnsworth Unit. Energy Procedia, 63: 7891-7912.

Yoshida, N., Levine, J., & Stauffer, P. 2016. Investigation of uncertainty in CO2 reservoir models: A sensitivity analysis of relative permeability parameter values. International Journal of Greenhouse Gas Control, 49: 161-178.

Zarifi, A., Sahraei, E., & Parvizi, H. 2012. Pseudo Relative Permeability Compensation for Numerical Dispersion. Petroleum Science and Technology, 30, no. 15: 1529-1538.

Zhang et al. 2017. Effect of capillary pressure and salinity on CO 2 solubility in brine aquifers. International Journal of Greenhouse Gas Control, 57: 26-33.

Zhao et al. 2010. Sensitivity analysis of CO2 sequestration in saline aquifers. Petroleum Science, 7, no. 3: 372-378.

Abstract

Assessment of CO_2 sequestration security Using Distance-based Generalized Sensitivity Analysis Method

Junhee Kang

Department of Energy Systems Engineering

Seoul National University

Sequestrated CO_2 in the geological formations can cause various problems. Therefore, it is important to monitor CO_2 plume migration and pressure build-up to accurately predict CO_2 storage security, injectivity and capacity. A reservoir model for CO_2 storage includes uncertain parameters. Thus, it is required to analyze sensitive parameters for elaborate reservoir modeling.

This study provides sensitivity analysis results of the small-scale CO_2 injection site, located at Youngil Bay within the Pohang basin. Distance-based Generalized Sensitivity Analysis (DGSA) is utilized with K-medoids clustering and Latin Hypercube Sampling method. The proposed method quantifies the sensitivity of each parameter and gives reliable results using 100 reservoir models.

As the result, the amount of dissolved CO_2 in the brine and

immobile CO_2 trapped in the pore are sensitive to salinity, residual water saturation, residual gas saturation, entry capillary pressure and maximum relative permeability value of CO_2. In addition, residual water saturation and residual gas saturation is closely related to each other in terms of parameter interactions.

Sensitive parameters proposed by this study can be applied to assess the CO_2 storage security and capacity.

keywords : carbon dioxide, geological sequestration, Distance-based Generalized Sensitivity Analysis, Youngil bay, Pohang basin, CO_2 storage security

Student Number : 2016-21283