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

공학박사 학위논문

앙상블칼만필터를 이용한 대수층 동반 채널가스저류층 특성화 및 불확실성 평가

Characterization and Uncertainty Assessment of Channel Gas Reservoirs with an Aquifer Using EnKF

2017 년 2 월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

김 성 일

초 록

저류층 특성화는 주어진 정보들을 통합하여 신뢰할 수 있는 저류층 모델들을 만드는 과정이다. 특성화의 최적화 기법 중 하나인 앙상블 칼만필터(ensemble Kalman filter, EnKF)는 많은 장점을 가졌으나 이산적인 격자시스템에서 채널 패턴과 연결성 같은 특성을 유지하기 어렵다. 특히 대수층 동반 채널저류층에서는 큰 불확실성 때문에 EnKF 적용 시 안정된 히스토리매칭 결과를 얻기 힘들다.

본 연구에서는 대수층 동반 채널가스저류층에 알맞은 특성화를 위해 초기 앙상블디자인 기법, 이산코사인변환법, 암상비율보존법을 EnKF와 통합하여 제시한다. 초기 앙상블디자인 기법은 참조모델의 물 생산거동을 잘 예측하는 초기모델들을 선별하고 그 평균필드의 상 · 하위 5% 유체투과율 중에서 격자를 추출하여 추가 정적자료로 사용한다. 이 기법은 저류층의 제한된 지질정보로부터 신뢰할 수 있는 초기 앙상블을 제공하므로 결과적으로 안정된 특성화 결과를 얻게 한다. 이산코사인변환법은 핵심경향을 추출하여 전반적인 채널패턴을 파악하게 하고 암상비율보존법을 통해 채널연결성을 확보한다.

제안방법을 대수층의 유무, 저류층 규모의 차이, 2차원과 3차원 네 개의 케이스에 적용하였다. 제안방법은 불확실성이 높거나 교정해야 할 인자가 많은 경우에도 채널 연결성과 패턴을 보존하며 적절한 대수층인자 평가를 통해 성공적인 히스토리매칭 결과를 제시한다. 따라서 제안방법은 저류층 운영 중에 필요한 합리적 의사결정에 도움을 줄 수 있다.

주요어: 앙상블칼만필터, 초기 앙상블디자인 기법, 이산코사인변환법, 암상비율보존법, 채널가스저류층

학 번: 2013-30994

목 차

초 록..... I
목 차.....II
List of Tables..IV
List of Figures..V

1. 서론.....1

2. 채널저류층의 특성화.....15
2.1 앙상블칼만필터.....15
2.2 초기 앙상블디자인 기법 21
2.3 이산코사인변환법.....25
2.4 암상비율보존법 32
2.5 제안방법.....35

3. 제안방법의 적용 결과.....37
3.1 대수층이 없는 2차원 채널가스저류층.....46
3.2 대수층 동반의 2차원 채널가스저류층.....57
3.3 대수층 동반의 3차원 채널가스저류층.....90

4. 결론.....112

참고문헌.....117

부록 A. Eclipse 데이터파일.....125

부록 B. 케이스 1에서 4의 특성화 결과.....131

부록 C. 케이스 3의 IEDS 민감도분석.....145

ABSTRACT.....152

List of Tables

Table 3.1 Reservoir model data and simulation conditions of cases 1 and 2…39

Table 3.2 Conditions of TI generation for cases 1 and 2……40

Table 3.3 Reservoir model data and simulation conditions of case 3……42

Table 3.4 Conditions of TI generation for case 3……..……42

Table 3.5 Reservoir model data and simulation conditions of case 4……44

Table 3.6 Conditions of TI generation for case 4……44

Table 3.7 Comparison of each performance in case 1……56

Table 3.8 Comparison of each performance in case 2……71

Table 3.9 Comparison of each performance in case 3……89

Table 3.10 Comparison of each performance in case 4……109

Table C.1 Normalized errors compared to the reference in sensitivity analysis……151

List of Figures

Figure 1.1 Procedures and examples of reservoir characterization……..2

Figure 1.2 Gas productions at wells 3, 5, 9 for 100 initial ensemble models: (a) no aquifer, (b) aquifers of the same strengths at the four sides, and (c) aquifers of different strengths at the four sides.…….6

Figure 1.3 Overall procedures of the proposed method……14

Figure 2.1 Comparison between airways and EnKF …….19

Figure 2.2 Generation of channel reservoirs with an aquifer by SNESim….22

Figure 2.3 Procedures of the proposed initial ensemble design scheme …….23

Figure 2.4 Average of ensemble members for each step of IEDS……24

Figure 2.5 Discrete cosine trasnform bases for 8 by 8 image representation (Jafarpour and McLaughlin, 2007) ……27

Figure 2.6 Examples of DCT application on JPEG file using part of upper left triangular coefficients ……..28

Figure 2.7 Example of DCT application on a channel reservoir model in 75 by 75 grid system ……29

Figure 2.8 Sensitivity analysis for the amount of DCT coefficients used for channel reservoir images: (a)~(c) 75 by 75 grid system, (d)~(f) 39 by 39 grid system……..31

Figure 2.9 Example of PFR in 75 by 75 channel reservoir model ……...34

Figure 2.10 Overall procedures of the proposed method with examples……36

Figure 3.1 Assimilation times in whole period…….39

Figure 3.2 Training image of cases 1 and 2…….……..40

Figure 3.3 The reference field of cases 1 and 2…….41

Figure 3.4 Training image of case 3…….……..42

Figure 3.5 The reference field of case 3……..43

Figure 3.6 Training image of case 4……..44

Figure 3.7 Three layers of the reference field in case 4……...45

Figure 3.8 Gas well productions of initial ensemble in case 1……..47

Figure 3.9 Updated results of gas well productions in case 1……..48

Figure 3.10 Updated results of total gas productions in case 1……..49

Figure 3.11 Characterization results of permeability distribution in case 1…..53

Figure 3.12 Examples of permeability distribution results in case 1……55

Figure 3.13 Well gas and water productions of the initial ensemble in case 2……58

Figure 3.14 Updated results of well gas and water productions in case 2……..61

Figure 3.15 Updated results of total gas and water productions in case 2……..65

Figure 3.16 Characterization results of permeability distribution in case 2....66

Figure 3.17 Examples of permeability distribution results in case 2……...69

Figure 3.18 Characterization results of aquifer strengths in case 2…..……..70

Figure 3.19 Well gas and water productions of the initial ensemble in case 3..73

Figure 3.20 Updated results of well gas and water productions in case 3……..77

Figure 3.21 Updated results of total gas and water productions in case 3……..82

Figure 3.22 Characterization results of permeability distribution in case 3…..83

Figure 3.23 Examples of permeability distribution results in case 3....……..85

Figure 3.24 Characterization results of aquifer strengths in case 3…...……..88

Figure 3.25 Well gas and water productions of the initial ensemble in case 4……91

Figure 3.26 Updated results of well gas and water productions in case 4……..95

Figure 3.27 Updated results of total gas and water productions in case 4……..98

Figure 3.28 Updated results of total water productions by box plot in case 4……100

Figure 3.29 Characterization results of permeability distribution in case 4…104

Figure 3.30 Examples of permeability distribution results in layer 1 of case 4……105

Figure 3.31 Characterization results of aquifer strengths in case 4…...……..108

Figure 3.32 Examples for IEDS application in case 4……...……..111

Figure B.1 Updated results of gas well productions in case 1……...……..132

Figure B.2 Updated results of gas well productions in case 2……...……..133

Figure B.3 Updated results of water well productions in case 2……...……..134

Figure B.4 Updated results of gas well productions in case 3……...……..135

Figure B.5 Updated results of water well productions in case 3……...……..136

Figure B.6 Updated results of gas well productions in case 4……...……..137

Figure B.7 Updated results of water well productions in case 4……...……..138

Figure B.8 Updated permeability results of all steps in case 1~4…...……..142

Figure B.9 Examples of permeability distribution results in layer 2 and 3 of case 4……144

Figure C.1 Permeability distribution results of sensitivity analysis in case 3……146

Figure C.2 Total water prediction results of initial and updated ensemble by sensitivity analysis in case 3……149

1. 서론

석유는 온도, 압력, 조성에 따라 기체, 액체, 고체로 존재하는 자연발생의 탄화수소 혼합물이다. 석유공학은 이러한 석유를 자원으로 이용하기 위해 탐사, 개발, 생산, 수송에 관련된 전반적인 지식을 다룬다. 그 중 개발 및 생산 과정에서 올바른 의사결정을 위해 저류층의 구조와 유체거동을 잘 파악해야 한다. 저류층이란 원유가 매장되어 있는 지하매질로 포함유체에 따라 오일저류층 또는 가스저류층으로 구분된다.

저류층의 거동을 파악하기 위해서는 주어진 정보들을 이용하여 신뢰성 있는 저류층 모델을 만들어야 한다. 이를 저류층 특성화라고 하며 Fig. 1.1은 하나의 예시를 보여준다. 트레이닝이미지(training image, TI)와 코아로부터 얻은 암상 등의 정적자료는 지구통계적 기법을 이용하여 초기모델들을 생성하는데 사용될 수 있다. 초기모델이 생산량이나 유정압력과 같이 시간에 따라 변하는 동적자료를 만족하도록 갱신하는 히스토리매칭(history matching)을 수행하면 신뢰할 수 있는 저류층 모델을 만들 수 있다. 이는 개발과 생산에 필요한 운영과 관리를 합리적으로 수행하도록 돕는다.

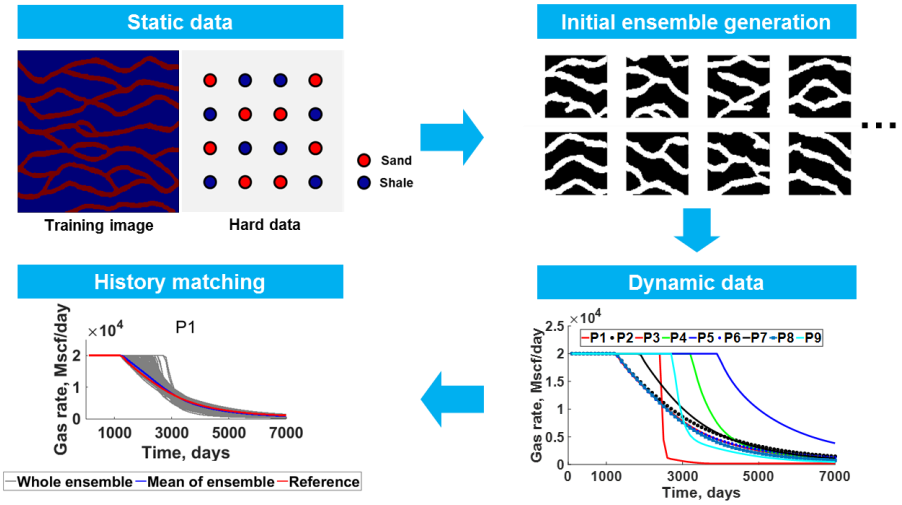


Figure 1.1 Procedures and examples of reservoir characterization.

저류층 특성화에서는 경우에 따라 알맞은 방법을 선택해야 한다. 오일저류층에서 물과 오일은 같은 액체상이므로 각 유체의 저류층 내 거동이 유사하다. 반면 가스저류층의 물과 가스는 상이 다르므로 거동의 큰 차이를 보인다. 따라서 오일저류층과 가스저류층의 서로 다른 유체거동 특성을 고려한 특성화를 해야한다.

다음 식 (1.1)과 (1.2)는 저류층이 정상상태일 때의 오일생산량과 가스생산량 계산식이다(Economides *et al.*, 1994). 두 식을 통해 오일저류층과 가스저류층 거동의 차이를 확연히 비교할 수 있다. 두 식의 형태는 거의 비슷하나 압력이 생산량에 미치는 영향은 상이하다.

$$q_{oil,water} = \frac{kh(p_e - p_{wf})}{141.2B\mu[ln(r_e/r_w) + s]} \quad (1.1)$$

$$q_{gas} = \frac{kh({p_e}^2 - {p_{wf}}^2)}{1424\bar{\mu}\bar{Z}T[ln(r_e/r_w) + s]} \quad (1.2)$$

여기서 q는 생산량(STB/day), k는 유체투과율(md), h는 저류층의 두께(ft), p_e는 평균 저류층압력(psia), p_{wf}는 유동공저압력(psia), B는 용적부피계수(rb/stb), μ는 점성도(cp), r_e는 저류층 유동 반경(ft), r_w는 시추공 반경(ft), s는 유체투과율 감소 인자이다. STB는 stock tank barrel, rb는 reservoir barrel을 의미한다. 식 (1.2)에서 다른 계수는 (1.1)과 같지만 q의 단위는 MSCF/day, Z는 가스압축지수, T는 온도($°R$)이다.

오일저류층의 경우 다른 조건이 일정하다면 생산량은 저류층압력과 공저압력의 차이에 비례한다. 반면 가스저류층에서는 저류층압력과 공저압력의 제곱 차이에 생산량이 비례한다. 이는 오일 및 가스 저류층의 조건이 동일하다면 가스저류층에서 생산이 훨씬 쉽게 이뤄짐을 의미한다.

따라서 가스저류층은 오일저류층과 달리 80~90%의 높은 회수율을 보이며 저류층의 생산성이 좋아 상대적으로 생산관리가 용이하다. 반면 대수층을 동반한 가스저류층은 50~70%의 회수율을 갖는다(Ahmed, 2010). 이는 생산에 따른 저류층압력 감소와 대수층 물이 유동이 용이한 부분으로만 흐르는 현상(water fingering)으로 인해 유입된 물 사이에 갇히는 가스(trapped gas)가 생기거나

물돌파현상(water breakthrough)이 발생하기 때문이다(Holtz, 2002). 대수층은 생산성에 중대한 영향을 미치므로 가스저류층에서 대수층 특성을 고려하고 파악하는 것이 중요하다.

대수층과 함께 저류층 거동에 큰 영향을 미치는 것은 저류층의 퇴적 종류와 형태이다. 대부분 저류층의 유체투과율은 가까운 위치에서 유사한 값을 갖는다. 하지만 강이나 하천 등을 따라 퇴적된 곳은 채널(channel)을 형성하며 그 지형만의 연속성(continuity), 연결성(connectivity), 패턴(pattern) 특성을 갖는다. 강을 따라 입자가 굵은 모래가 퇴적되고 그 외 부근에 진흙 같이 작은 입자가 퇴적됐다면, 채널의 암상은 사암으로 배경의 암상은 셰일로 구성될 것이다. 그렇다면 채널에서는 높은 유체투과율을, 배경에서는 낮은 유체투과율을 가지게 되어 유체거동의 급격한 차이를 보이게 된다.

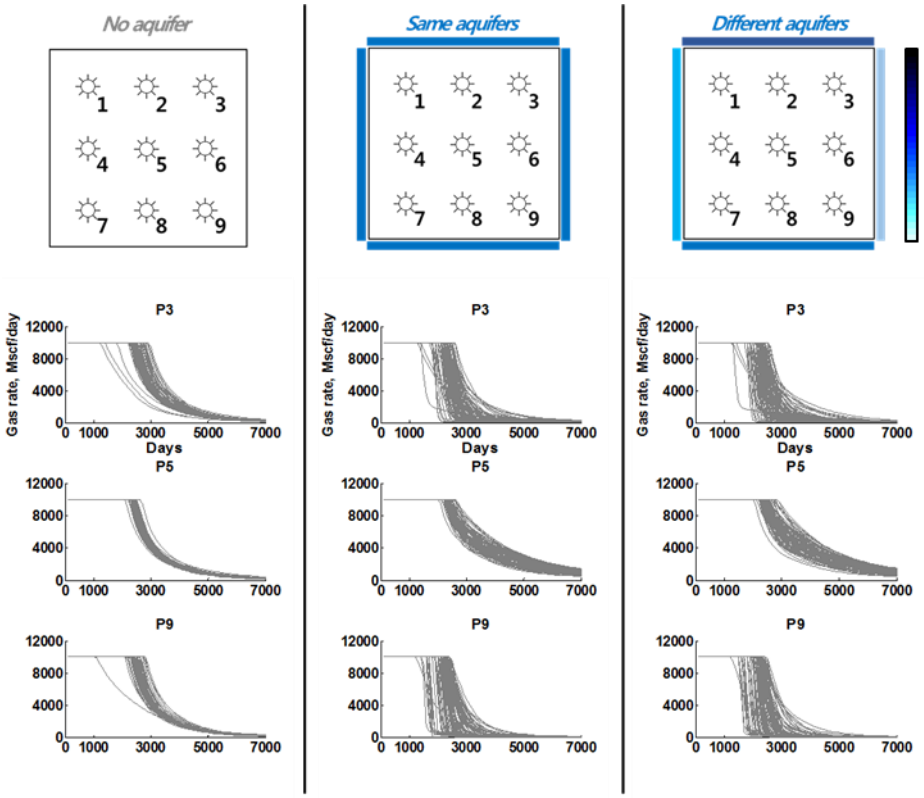
따라서 채널저류층 개발 시 채널 위에 위치한 유정은 그렇지 않은 유정에 비해 높은 오일 또는 가스 생산량을 보인다. 결국 채널위치가 생산과 개발에 필요한 의사결정에 중요한 요소가 된다. 결론적으로 개발대상이 되는 채널저류층에서 채널 위치와 모양을 파악하는 것이 중요하다.

지구통계학은 공간적 또는 시간적으로 분포하는 물리적 현상이나 자료의 분석에 적용할 수 있는 통계학의 한 분야이다(최종근, 2013). 지구통계기법은 크게 두점지구통계기법과 다점지구통계기법으로 나눌 수 있다.

두점지구통계기법은 두 점 사이의 관계를 이용하여 물리적 특성값을 평가하거나 예측하는 기법이다. 수학적으로 단순하여 적용이 쉽지만 자료의 관계를 거리로만 고려한다는 한계가 있다. 반면 다점지구통계기법은 다수의 점을 이용하여 공간적 패턴인식 기법이다. 트레이닝이미지를 함께 이용해 채널의 특징인 연속성, 연결성, 패턴을 유지하면서 모델을 생성할 수 있다.

본 연구에서는 초기 채널저류층 모델을 생성하기 위해 다점지구통계기법 중의 하나인 SNESim(single normal equation simulation)을 이용하였다. SNESim의 자세한 원리는 다음과 같다. 사용자가 설정한 격자정보(data tamplate)를 트레이닝이미지에 적용하여 특정 패턴에서 격자 중심이 특정 암상을 가질 조건부 확률을 모두 계산하여 정리한다. 이를 검색트리(search tree)라고 한다. 모델을 생성할 때는 정적자료와 검색트리를 이용하여 확률적으로 격자의 암상을 정한다. 이를 반복하면 채널특성과 정적자료를 보존하면서 채널필드를 생성할 수 있다(Remy *et al*., 2009).

초기 정보를 이용해 100개의 채널가스저류층 모델들을 생성하고 시뮬레이션한 결과는 Fig. 1.2와 같다. 대수층이 없는 Fig. 1.2a는 가스의 높은 유동성 때문에 각 유정에서의 가스생산량 불확실성이 크지 않다. 반면 대수층 동반의 Fig. 1.2b는 대수층 물이 선택적으로 유동하면서 가스거동의 불확실성을 증가시킨다. 게다가 Fig. 1.2c처럼 대수층의 크기가 다르면 더 큰 가스거동의 불확실성이 나타난다.



(a) (b) (c)

Figure 1.2 Gas productions at wells 3, 5, 9 for 100 initial ensemble models: (a) no aquifer, (b) aquifers of the same strengths at the four sides, and (c) aquifers of different strengths at the four sides.

이처럼 보통의 가스저류층에서는 불확실성이 크지 않고 가스유동이 수월하기 때문에 특성화의 필요성이 크지 않았다. 하지만 대수층을 동반한 경우 생산거동의 불확실성이 급격히 커지고 미래거동 예측이 어려워진다. 따라서 적절한 의사결정을 돕기 위해 신뢰성 있는 특성화 기법이 요구된다. 이러한 수요에 따라 다음과 같은 관련 연구들이 제시되어 왔다.

Stenvold 등(2008)은 4D 중력자료를 이용해 높은 정확성으로 물이 휩쓴 저류층 지역을 정량화할 수 있었다. Glegola 등(2012a, 2012b)은 대수층을 동반한 가스저류층의 특성화 연구를 수행하였다. 대수층의 물이 저류층의 어디까지 침범했는지를 EnKF에서 4D 중력자료를 이용하여 예측하거나 대수층 관련 인자를 앙상블스무더(ensemble smoother, ES)를 이용하여 특성화하였다. 하지만 위 연구들은 필요 관측자료 수가 너무 많고 동서남북 네 방향의 대수층을 고려하지 못한다. 또한 특성인자들이 정규분포를 따르는 저류층에 연구대상이 국한되어 있다.

따라서 대수층 동반의 채널가스저류층에서는 대수층인자와 채널특성을 고려한 새로운 특성화 기법을 제시해야 한다. 적절한 특성화가 이뤄진다면 대수층 크기와 실제 저류층의 채널패턴을 알아내고 신뢰성 있는 모델들을 바탕으로 적절한 미래 생산량 예측을 할 수 있다.

저류층 특성화는 저류층 정보, 전이모델, 최적화 기법의 세 가지 요소를 필요로 한다. 저류층 정보는 코아샘플자료, 탄성파자료, 시추공을 통해 얻는 유정로깅자료 등이 있다. 이들을 이용해 초기 저류층모델들을 생성하고 모델들의 저류층 거동을 계산할 수 있는 전이모델이 필요하다. 전이모델로 예측한 초기모델의 거동과 현재까지 알고 있는 실제 저류층의 생산자료를 비교하여 저류층모델들을 수정한다. 그 거동의 차이를 줄여 나가는 과정을 히스토리매칭이라 하며 이를 위한 최적화 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 최적화 기법으로서 앙상블칼만필터(esnemble Kalman filter, EnKF)를 이용하였다. EnKF는 다수의 모델인 앙상블을 이용한다. 다수의 결과는 저류층 정보나 최적화 자체의 불확실성을 반영함으로써 합리적인 의사결정에 도움을 준다(Gu and Oliver, 2004, 2006).

Evensen(1994)은 해양학에 EnKF를 처음 제안하였다. EnKF는 해양학뿐만 아니라 기상학, 석유공학 등의 다양한 분야에서 쓰이고 있다(Houtekamer *et al*., 2005; Nævdal *et al*., 2002). EnKF는 관측자료를 이용한 실시간 교정, 건실한 수학적 배경, 불확실성 평가, 다양한 전이모델에의 적용성 등 여러 장점을 가지고 있다(Aanonsen *et al*., 2009).

하지만 알고리즘 안에서 교정인자의 물리적 특성을 고려하지 못하기 때문에 때론 교정한 인자값이 지나치게 큰 오버슈팅(overshooting)이나 작은 언더슈팅(undershooting)이 발생한다. 또한 다수모델의 평균을 참으로 여기는 알고리즘 상의 특징 때문에

몇 번의 교정 후 모델들이 서로 너무 비슷해져 더 이상 적절한 교정이 이뤄지지 못하는 현상이 발생할 수 있는데 이를 필터발산(filter divergence)이라 한다. 언급한 두 가지는 EnKF의 전형적인 문제점으로 지적된다(Houtekamer and Mitchell, 1998; Jung and Choe, 2012; Yeo *et al*., 2014; Lee *et al*., 2016). 교정하려는 저류층 물성이 정규분포를 따른다는 가정 때문에 특성화할 수 있는 목표 저류층이 제한되기도 한다(Lee *et al*., 2013b).

이러한 EnKF의 단점을 극복하기 위해 다양한 연구들이 제시됐다. Park과 Choe(2006)는 모델들이 교정되면서 서로 과도하게 비슷해지는 것을 방지하고자 모델 재생성으로 추정오차공분산의 감소 제어법을 제안하였다. Shin 등(2010)은 비모수접근법을 이용하여 저류층모델의 인자분포를 정규분포로 변환하였다. 그 결과 해당 물성이 정규분포를 따른다는 EnKF의 가정을 만족시켜 특성화가 원활히 수행될 수 있었다. Jeong 등(2010)은 gradual deformation method라는 광역 최적화 기법을 EnKF에 적용하여 둘의 약점을 보완한 방법을 제안하였다.

Devegowda 등(2007)은 민감도 기반 공분산 지역화를, Jung과 Choe(2012)는 유선시뮬레이션 기반의 공분산 지역화를 이용하여 특성화 속도를 높이고 관측자료와 저류층 물성 간의 관계를 반영하였다. 또한 Lee 등(2015)은 거리기반 공분산 지역화의 민감도를 분석하고 가스저류층에 적절한 모델을 제시하였다.

하지만 채널저류층의 경우 암상에 따라 저류층인자가 확연히

다른 이봉분포를 따르고 채널 고유의 특성인 연결성이나 패턴을 갖는다. 따라서 일반적인 EnKF로는 채널저류층을 신뢰성 있게 특성화할 수 없다(Lorentzen *et al*., 2012; Lee *et al*., 2014; Kim *et al*., 2016). 왜냐하면 저류층을 모사하는 시스템에서는 격자별로 물성값들이 배정되고 EnKF 또한 이들을 격자단위로 교정하기 때문이다. 이같이 EnKF는 채널의 비균질적인 유체투과율 변화와 채널 연결성을 반영하지 못하므로 이를 보완하기 위한 연구들이 제시되었다.

Jafarpour와 McLaughlin(2007)은 이산코사인변환법(discrete cosine transform, DCT)을 EnKF에 적용하여 히스토리매칭을 수행하였다. DCT는 격자단위를 넘어서 전반적인 패턴정보를 제공하며 EnKF에서 채널의 연결성과 패턴이 안정적으로 반영된 특성화가 수행되게 한다. DCT는 다수의 해가 존재하는 역산문제에서 채널특성을 보존하면서 히스토리매칭 수행능력의 개선을 보였다(Jafarpour and McLaughlin, 2007, 2008, 2009; Nejadi *et al*., 2012a, b). Lee 등(2013a, b, 2016, 2017a)은 비슷한 저류층모델들끼리 군집화하여 군집에 따라 공분산을 계산하고 교정함으로써 채널저류층 특성화 성능을 향상시켰다.

여러 학자들에 의해 DCT를 응용한 방법들이 다양하게 제시되어 왔다. 하지만 대수층 동반의 채널가스저류층에 적용했을 때는 큰 불확실성과 대수층인자를 미처 고려하지 못해 안정된 히스토리매칭 성능을 제시하기에 부족하였다. 전반적인 패턴은 알 수 있지만 채널과 배경의 경계가 모호하고 채널연결성이 명확히 파악되지

않아 유정의 생산거동을 신뢰성 있게 예측할 수 없었다. 이를 위한 대안으로 본 연구에서는 할당 비율만큼 암상을 지정하는 암상비율보존법(preservation of facies ratio, PFR)을 제안한다(Kim *et al.*, 2016).

PFR은 트레이닝이미지 또는 참조필드의 암상을 안다고 가정하고 이를 각 앙상블에 적용하여 해당 암상의 특성을 할당한다. 직관적으로 같은 암상은 같은 특성을 가질 것이라는 원리이다. 이를 적용하면 DCT만으로는 부족했던 채널특성의 보존 성능을 개선할 수 있다.

기존 연구에서 DCT를 이용한 오일채널저류층에서의 EnKF 성능 개선은 확인하였다. 또한 PFR로 채널특성 보존 성능의 개선을 기대할 수 있다. 하지만 대수층을 동반한 채널가스저류층은 채널특성의 유지뿐만 아니라 대수층으로 인한 큰 불확실성까지 감안할 수 있는 방법을 필요로 한다. 불확실성이 큰 만큼 초기 앙상블이 중요하므로 제한된 저류층 정보로도 신뢰할 수 있는 초기 채널저류층 모델을 생성해야 한다. 특히 EnKF는 모델들의 평균을 기준으로 물성을 교정하기 때문에 초기모델이 특성화 결과에 지대한 영향을 미친다(Lee *et al.*, 2016). 따라서 초기 앙상블 디자인에 관한 많은 연구가 제안되었다.

Peters 등(2011)은 초기 채널저류층 모델들을 거리기반으로 나타내고 실제 저류층의 생산량을 기준으로 적절한 초기 앙상블을 선별하는 방법을 도입하였다. Nejadi 등(2015)은 교정된 앙상블의

분산을 이용하여 저류층 위의 중요 지점들을 재추출하고 그를 바탕으로 한 앙상블 재생성 기법을 제안하였다. Kang 등(2016)은 특이값분해법(singular value decomposition, SVD)으로 초기 앙상블의 공분산을 분해하여 신뢰성 있는 모델만을 추출하였다. Lee 등(2017b)은 저류층 격자가 어떤 암상을 얼마의 확률로 가지는지를 나타낸 확률지도를 이용한 새로운 앙상블 생성법을 제안하였다. 이 같은 연구들은 오일저류층에만 초점이 맞춰져 있거나 가스저류층에서의 대수층 특성과 침입하는 물의 거동은 반영하지 않는다. 따라서 대수층 동반 채널가스저류층을 위한 앙상블디자인 기법을 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 대수층 동반 채널가스저류층의 신뢰성 있는 특성화를 위하여 EnKF와 함께 다음 세 가지의 기법의 통합 방법론을 제시한다: 초기 앙상블디자인 기법(initial ensemble design scheme, IEDS), DCT, PFR. 먼저 EnKF로 저류층 모델들을 교정하고 불확실성을 평가한다. IEDS는 불확실성이 높은 대수층 동반 채널가스저류층 특성화에서 적절한 초기 앙상블을 제공한다. DCT와 PFR을 이용하여 채널특성을 고려하고 안정된 특성화 결과를 얻을 수 있도록 보완한다.

Fig. 1.3은 본 연구에서 제안하는 방법의 전체 흐름을 보여준다. 검은 상자는 전통적인 EnKF의 과정이고 빨간 점선 상자는 본 연구에서 추가한 과정들이다. 처음에는 초기 앙상블에 IEDS를 적용하여 새로운 앙상블을 생성한다. DCT와 PFR을 차례대로

적용하고 교정설정에 따라 이를 반복하여 최종 교정된 저류층 모델들을 얻는다.

본 논문은 총 4장으로 구성된다. 1장에서는 현재까지 수행되어 온 연구들의 한계를 파악하고 본 연구의 필요성과 목적을 제시한다. 2장에서는 본 연구의 목적을 달성할 수 있도록 하는 기존기법인 EnKF, DCT와 본 연구에서 새롭게 제안하는 PFR, IEDS에 대해 설명한다. 3장은 제시된 기법들이 적용된 연구결과를 보여준다. 대수층이 없는 2차원 저류층, 대수층 동반의 2차원 저류층, 대수층 동반의 보다 큰 규모의 저류층, 대수층 동반의 3차원 저류층에 대한 결과를 보일 것이다. 4장에서는 연구결과들을 정리하고 연구결론을 언급한다.

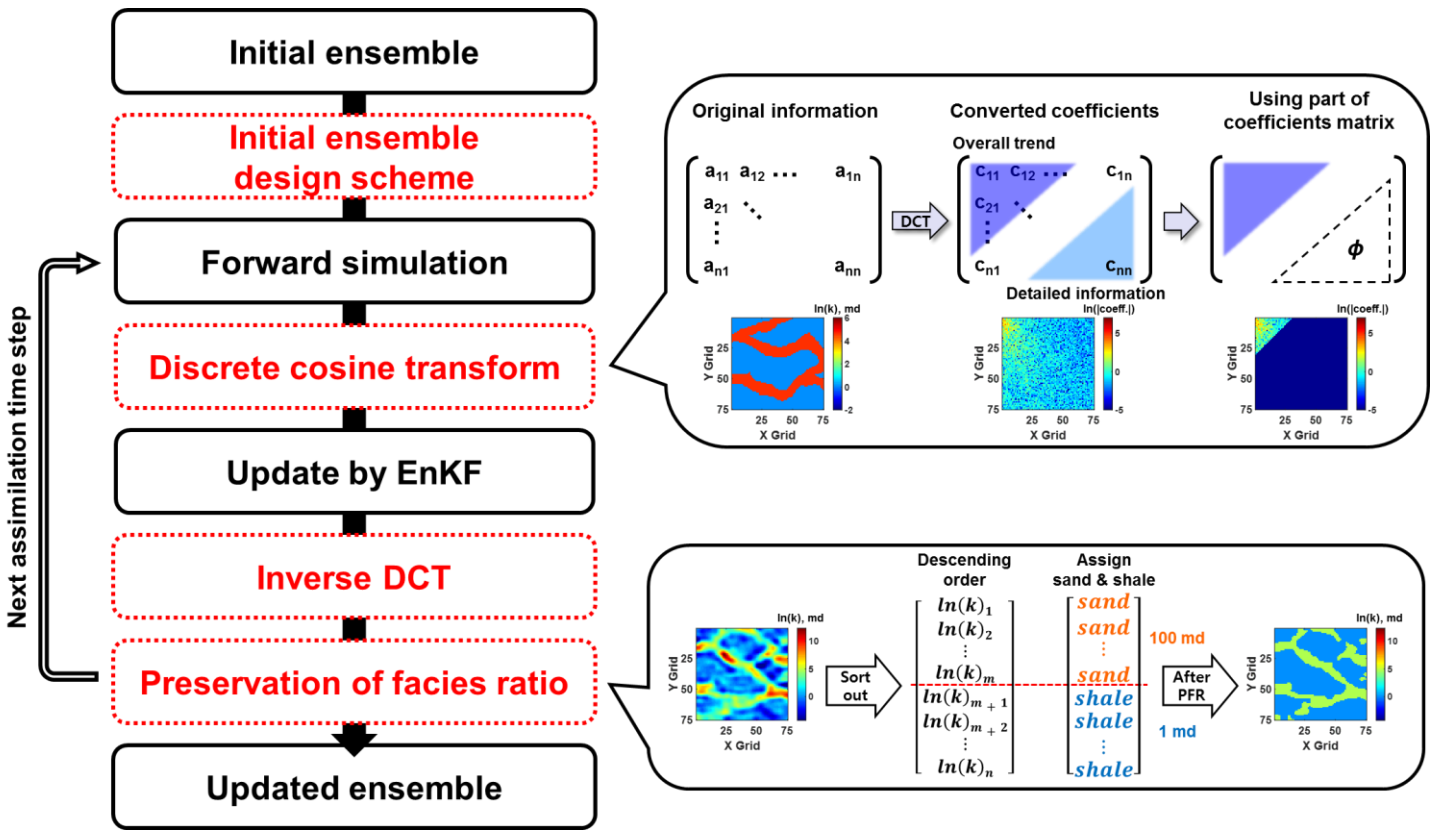


Figure 1.3 Overall procedures of the proposed method.

2. 채널저류층의 특성화

저류층 특성화를 위해 본 연구에서 사용되는 기본적인 방법은 EnKF이다. 하지만 기존 연구들에서도 언급되듯이 일반적인 EnKF만으로는 채널특성을 특성화할 수 없다. 따라서 EnKF와 함께 IEDS, DCT, PFR을 적용하며 이들의 사용목적과 원리, 효과 및 적용결과들을 여기서 설명한다.

2.1 앙상블칼만필터

EnKF는 앙상블기반기법 중 하나로서 여러 모델을 생성하고 관측자료를 이용해 이들을 순차적으로 교정하여 최종 업데이트된 다수의 모델을 결과로 준다. EnKF에서 하나의 모델은 상태벡터로 표현된다. 상태벡터는 다음 식 (2.1)과 같이 정의되고 다수의 모델을 앙상블이라 칭한다.

$$y_{t,i} = \begin{bmatrix} m_t^s \\ m_t^d \\ d_t \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

식 (2.1)에서 m_t^s 는 시간에 따라 변하지 않는 저류층의 석유물리적 특성들인 정적인자를 의미한다. 예를 들면, 암석 내 빈 공간의 비율인 공극률, 공극 사이를 유체가 얼마나 잘 흐르는지를 나타내는 유체투과율 등의 값이다. m_t^d 는 시간에 따라 변하는 동적인자로 저류층압력이나 물, 오일, 가스 포화도 등을 의미한다. d_t는 해당 정적, 동적인자를 가지는 저류층이 전이 시뮬레이션에서 보이는 거동을 의미한다. 즉, 가스 및 오일 생산량과 같은 시뮬레이션 결과로서의 예측값이다.

EnKF는 두 개의 단계로 구성된다. 하나는 전이모델을 이용하여 저류층 거동을 예측하는 단계, 다른 하나는 인자들을 교정하는 단계이다. 예측과 교정을 한 번씩 번갈아 가면서 반복하여 최종 모델을 얻는다. 식 (2.2)는 예측단계를 설명한다.

$$\begin{bmatrix} m_{t+1}^d \\ d_{t+1} \end{bmatrix} = \mathrm{f}(m_t^s, m_t^d) \tag{2.2}$$

여기서, f는 전이모델을 의미한다. 저류층이 갖는 정적, 동적인자가 있을 때 전이모델은 현재의 저류층 인자와 생산조건 등을 고려하여 저류층의 미래거동을 예측한다. 그 결과로 다음 시간의 동적인자(m_{t+1}^d)와 예측값(d_{t+1})을 얻을 수 있다.

상태벡터는 식 (2.3)과 같이 교정된다. y_j^p와 y_j^a는 각각 교정되기 전과 후의 상태벡터를 의미한다. p와 a는 각각 교정전(priori)과 교정후(assimilated)를 뜻한다. K는 칼만게인(Kalman gain)을 의미하며 식 (2.4)와 같이 구해진다. 행렬 H는 1과 0만으로 구성된 측정행렬연산자(measurement matrix operator)로 상태벡터에서 예측값을 추출한다.

d_j는 저류층을 개발하는 현장에서 얻어지는 관측값들을 의미한다. 물, 오일, 가스의 생산량, 공저압력 등을 예로 들 수 있다. 관측값인 d_j와 상태벡터들의 예측값인 Hy_j^p의 차이가 클수록 기존의 상태벡터는 크게 교정된다. 이는 예측값이 관측값과 다를수록 해당 저류층모델이 실제 저류층과 다를 가능성이 크므로 많이 교정한다는 의미다.

식 (2.4)에서 C_Y^p와 C_D는 각각 추정오차공분산(estimated error covariance)과 관측오차공분산(measurement error covariance)을 의미한다. 추정오차공분산은 식 (2.5)와 같다. 이 식은 각 상태벡터들이 평균값으로부터 얼마나 벗어나 있는가를 나타낸다. 칼만게인은 추정오차공분산을 최소화하도록 유도된 식이며 이로 인해 교정을 거치면서 상태벡터들은 서로 유사해지는 경향을 보인다. 이는 처음에 생성된 모델인 초기 앙상블의 신뢰성이 중요함을 시사한다.

$$y_j^a = y_j^p + K(d_j - Hy_j^p) \tag{2.3}$$

$$K = C_Y^p H^T (HC_Y^p H^T + C_D)^{-1} \tag{2.4}$$

$$C_Y^p = \frac{1}{N_e - 1} \sum_{i=1,j=1}^{N_e} (y_i^p - \bar{y}^p)(y_j^p - \bar{y}^p)^T \tag{2.5}$$

EnKF을 이용한 저류층 특성화는 수식 상에서 복잡해 보이지만 그 원리는 비행기가 항로를 찾아가는 것과 유사하며 간단하다. Fig. 2.1에서 검은 실선은 비행기가 마드리드에서 서울까지 갈 때 최적의 경로이다. 하지만 실제로 비행기의 운항은 검은 실선과 정확히 부합하진 않는다. 이론 상으로 검은 실선의 위치 좌표는 알지만 완벽하게 그를 따를 순 없기 때문이다.

처음 경로에서 항공기의 속도정보를 위성을 통해 파악하여 항공기의 위치를 예상할 수 있고 최적경로의 정보 또한 알고 있다. 항공기의 예상위치가 최적경로에 비해 너무 왼쪽이라면 오른쪽으로 항로를 수정할 필요가 있다. 차이의 정도가 크다면 오른쪽으로 크게 변경할 것이고 그렇지 않다면 약간의 수정만 할 것이다. 이러한 과정을 반복하면 최적경로와 유사한 경로를 따를 수 있다.

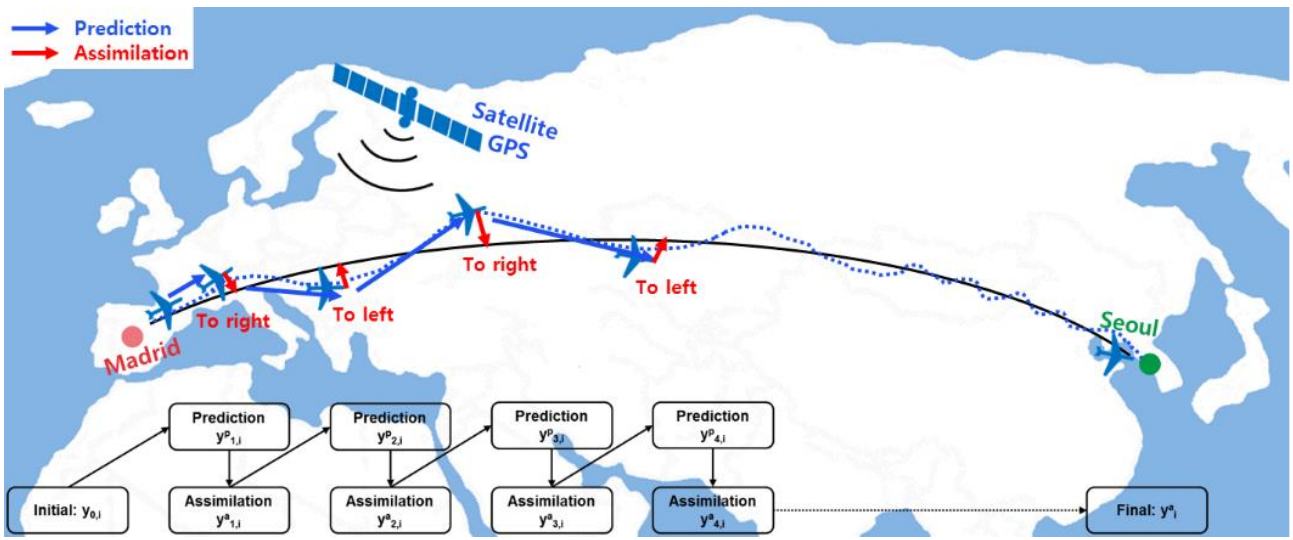


Figure 2.1 Comparison between airways and EnKF.

항공기의 예상위치는 현재의 저류층모델을 시뮬레이션하여 얻는 저류층 거동, 위성이 알려주는 항공기의 최적위치는 생산현장에서 얻어지는 관측값들, 항공 경로의 예상과 수정은 EnKF의 예측단계와 교정단계에 부합한다. 비행기가 몇 번의 예상과 수정을 거쳐 최종 목적지에 도착하는 것처럼 EnKF의 예측 및 교정 단계를 거쳐 최종 저류층 모델을 얻는다.

앙상블기반기법 중 다른 하나는 ES이다. Van Leeuwen과 Evensen(1996)은 EnKF의 시뮬레이션 횟수를 줄이고자 ES를 제안하였다. ES는 EnKF와 같은 원리지만 모든 시점에서의 관측값을 한 번의 교정에서 사용하여 특성화를 빠르게 수행한다. 식 (2.6)은 ES의 상태벡터이며 하나의 모델이 모든 시점의 관측값을 포함한다. 교정 횟수가 한 번이므로 EnKF의 가정에 맞지 않는 저류층에 적용할 때 가정의 위반 횟수가 적다는 장점이 있다(Skjervheim *et al*., 2011; 이경북, 2014).

$$y_i = \begin{bmatrix} m_t^s \\ m_t^d \\ d_1 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}, \quad t = 1, n \tag{2.6}$$

2.2 초기 앙상블디자인 기법

EnKF의 원리와 가정으로 인해 생기는 고유의 특징 때문에 초기 저류층 모델은 특성화 결과에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 신뢰성 있는 초기 앙상블은 성공적인 특성화를 위해 필수적이다. 대수층 동반의 채널가스저류층에 알맞은 초기 앙상블디자인 기법을 제안하기 위해서는 정적자료뿐만 아니라 동적자료를 적절히 이용해야 한다.

초기 앙상블은 SNESim을 이용하여 생성하였다. Fig. 2.2는 대수층 동반의 채널가스저류층 생성방법을 보인다. TI와 주어진 정적자료를 SNESim에서 이용하면 채널저류층을 생성할 수 있다. TI는 탄성파탐사의 결과, 지질학적 개념, 위성 및 항공 사진 등의 정보를 통합하여 만든 참고할 수 있는 지질이미지이다.

대수층을 모사하기 위해 채널저류층 네 경계 격자의 물포화도를 1로 설정한다. 해당 격자들의 공극부피를 저류층 시뮬레이터인 Eclipse 100의 키워드 MULTPV를 이용하여 원하는 배수로 증가시킨다. 이로써 저류층 주변 대수층을 모사할 수 있다.

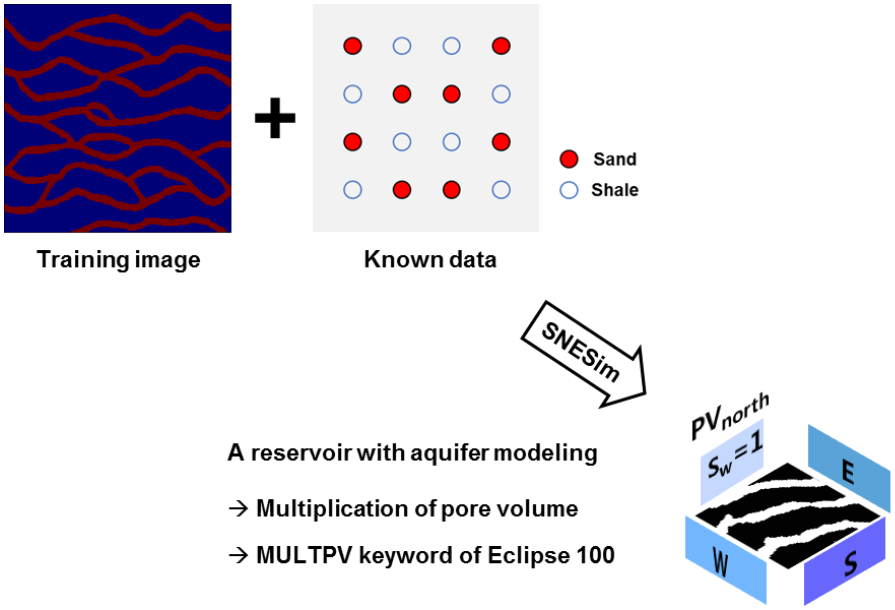


Figure 2.2 Generation of channel reservoirs with an aquifer by SNESim.

Fig. 2.3은 IEDS의 전반적인 과정을 하나의 예시모델들과 함께 보인다. 첫째로 다양성 확보를 위해 초기모델로 400개 채널저류층을 생성하고 시뮬레이션하여 미래거동을 예측한다. 참조필드의 물생산량과 비교하여 가장 비슷한 거동을 보이는 상위 50개 앙상블을 선별하고 이를 평균하여 하나의 필드를 얻는다. 평균필드의 유체투과율 값들을 정렬하고 상 · 하위 5%에서 무작위로 각 200개의 격자점을 뽑아 추가 정적자료로 사용한다. 마지막으로 원래 알고 있는 정적자료와 추가 자료를 이용하여 SNESim으로 100개의 새로운 앙상블을 생성한다.

초기모델의 의미 없는 불확실성을 감소시키는 것은 중요하지만 그에 못지 않게 모델의 다양성 유지도 중요하다. 참과는 거리가 먼 모델들은 불필요한 불확실성을 주지만 참조필드의 거동을 반영하는 다양성의 유지는 바람직하다(Vallès and Nævdal, 2009). 그래야만 초기 앙상블 중 참조필드를 찾아나갈 수 있는 후보해들을 포함할 가능성이 커지기 때문이다. 제시하는 IEDS는 참조필드의 사암과 셰일의 분포를 적절하게 반영함과 동시에 후보해들이 편향되는 것을 방지한다.

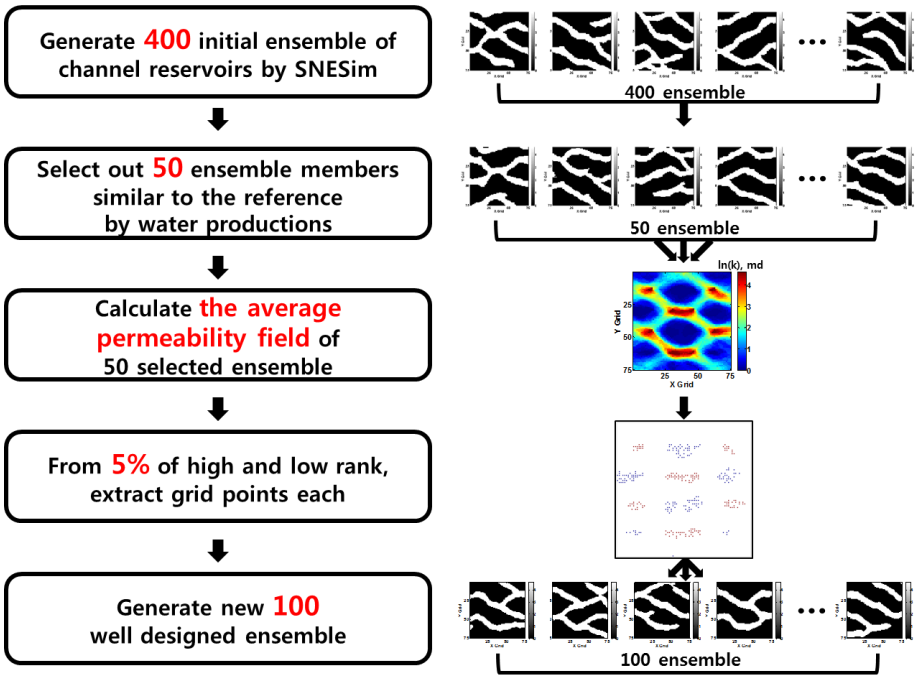
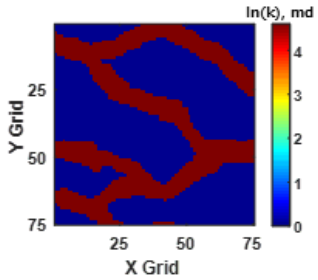
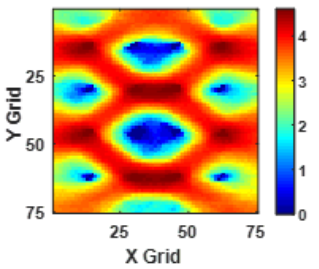


Figure 2.3 Procedures of the proposed initial ensemble design scheme.

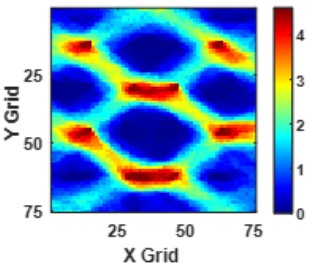
Fig. 2.4는 각 단계의 앙상블 평균을 예로서 나타낸 것이다. (a)는 참조필드, (b)는 초기 앙상블 400개의 평균, (c)는 선별된 50개 앙상블의 평균, (d)는 재생성된 100개 앙상블의 평균이다. (b)는 채널의 폭이 크고 경향성이 뚜렷하지 않으며 아직은 큰 불확실성을 갖는다. (c)는 참조필드와 비슷한 물생산량 거동을 보이는 모델들의 평균이다. 참조필드의 채널지역 근처에서 높은 유체투과율을 보인다. 재생성된 앙상블 (d)는 (c)의 경향을 반영하여 채널이 존재하는 부근에서 높은 유체투과율을 보이며 불확실성이 감소하고 전체 경향이 (b)에 비해 더욱 선명하다.



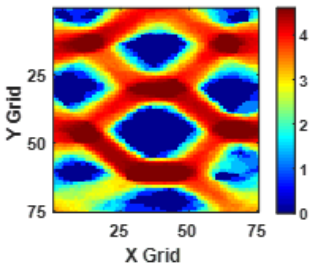
(a) Reference field



(b) Initial ensemble 400



(c) Selected ensemble 50



(d) Regenerated ensemble 100

Figure 2.4 Average of ensemble members for each step of IEDS.

2.3 이산코사인변환법

이산코사인변환법은 이미지 등의 정보를 이산적인 코사인 함수의 계수로 변환하여 나타내는 방법이다. 이산푸리에변환(discrete Fourier transform, DFT)은 지수가 복소수인 자연상수의 계수들로 정보를 나타내는 반면, DCT는 코사인 함수만을 이용한다. 또한 변환결과물이 복소수로 나오는 DFT와 달리 DCT에서는 결과가 실수로 나오기 때문에 자료처리가 용이하다. 이러한 특징 때문에 DCT는 영상 및 신호처리에 널리 사용되고 있다.

DCT와 같이 인자를 보다 낮은 차원으로 매개변수화하여 히스토리매칭에 적용한 예는 Karhunen-Loeve Transform(KLT)이 있다. 하지만 KLT에서는 공분산 함수를 알아야 하고 공분산 행렬이 자료의 특징을 잘 반영하지 못할 때 성공적인 히스토리매칭이 어렵고 계산효율이 떨어진다. Sarma와 Chen(2009)은 커넬(kernels)기법과 EnKF를 결합하여 정규분포가 아닌 필드에 적용하였다. 하지만 DCT에 비해 채널특성의 보존성능은 부족했다. 반면 DCT는 채널저류층의 특성을 보존하면서도 정보를 압축하기 때문에 높은 계산효율로 히스토리매칭을 개선시킬 수 있다(Jafarpour and McLaughlin, 2007; Panwar *et al.*, 2015).

1차원의 DCT 자료변환은 다음 식 (2.7)부터 (2.9)와 같다. 식 (2.7)은 $u(n)$이라는 자료를 $v(k)$라는 코사인의 계수로 나타낸다. N은 1차원 자료의 크기이다. DCT로 자료를 변환하면 자료의 수만큼

코사인 함수를 이용하고 계수의 개수도 같게 된다. 식 (2.9)는 변환된 자료인 $v(k)$를 넣어 원래의 자료인 $u(n)$으로 역변환(inverse discrete cosine transform, IDCT)하는 과정이다. 변환과 역변환 과정에서 원래 자료의 수만큼 코사인 계수를 사용한다면 자료손실 없이 온전히 원래 자료를 다시 얻는다.

$$v(k) = \alpha(k) \sum_{n=0}^{N-1} u(n) cos\left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right], 0 \le k \le N-1 \qquad (2.7)$$

$$\alpha(k) \equiv \begin{cases} \sqrt{2/N}, & k = 0 \\ \sqrt{1/N}, & 1 \le k \le N-1 \end{cases} \qquad (2.8)$$

$$u(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha(k) v(k) cos\left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right], \ 0 \le n \le N-1 \qquad (2.9)$$

하지만 대개의 경우 DCT로 변환한 모든 코사인 계수를 사용하지 않는다. 이는 코사인의 파장이 큰, 즉 저주파인 곳에서 에너지 집중 현상이 나타나는 것에 기인한다. 저주파의 코사인은 고주파의 것보다 전반적인 경향을 나타내는 정보를 갖는다. 사람이 육안으로 알아볼 수 있는 풍경이나 인물 등의 이미지 정보는 보통 일관된 경향이나 패턴을 가지므로 DCT계수의 일부만으로 이를 나타낼 수 있다.

특정 행렬을 DCT로 변환하여 계수를 얻을 때, 왼쪽 위의 성분일수록 저주파 코사인의 계수이며 오른쪽 아래의 성분일수록 고주파 코사인의 계수이다. 따라서 변환된 자료의 행렬에서 왼쪽

위의 일부 성분들만을 이용하더라도 이미지의 전반적인 특징이 파악된다.

Fig. 2.5는 8×8의 DCT 코사인 함수를 보여준다 (Jafarpour and McLaughlin, 2007). 오른쪽으로 이동하면 가로방향으로 주기가 짧아지고 밑으로 이동하면 세로 방향으로 주기가 짧아진다. 왼쪽 위의 성분일수록 큰 경향을, 오른쪽 밑의 성분일수록 정보의 미세한 부분을 나타낸다.

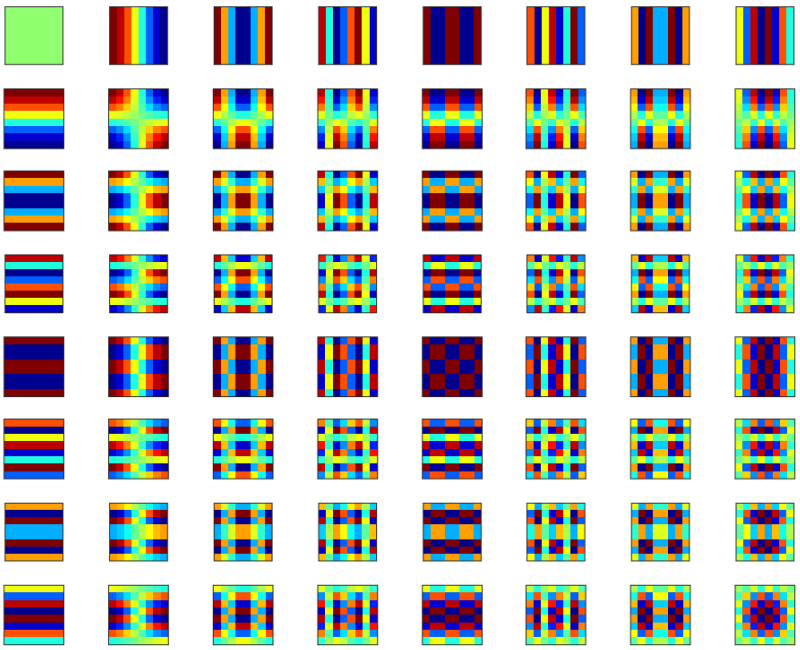


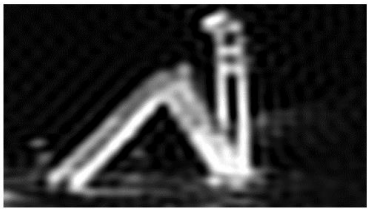
Figure 2.5 Discrete cosine trasnform bases for 8 by 8 image representation (Jafarpour and McLaughlin, 2007).

Fig. 2.6은 JPEG 이미지 파일을 DCT로 변환하고 그 중 좌측 상위 일부 성분만을 역변환하여 나타낸 예들이다. Fig. 2.6a는 원래 이미지로서 서울대 정문을 촬영한 흑백사진이다. Fig. 2.6b는 원래 변환된 계수 중에서 좌측 상위 300개의 성분, 전체 중 0.5%에 해당하는 성분만을 역변환하여 나타낸 것이다. 전체의 0.5%만으로도 구조물의 모양은 물론 선과 명암까지 구분할 수 있다. 손실되는 자료가 많아 질수록 선이나 배경의 구분이 모호해지고 미세한 부분은 파악하기 어려워지지만 전반적인 구조를 파악하는데 무리가 없다(Fig. 2.6c, 2.6d).

(a) Original image

(b) 0.5%

(c) 0.05%



(d) 0.01%

Figure 2.6 Examples of DCT application on JPEG file using part of upper left triangular coefficients.

Fig 2.7은 75 × 75 격자시스템의 채널저류층 모델에 DCT를 적용하여 얻은 성분 중 전체의 8%만을 이용하는 과정이다. 첫째로, 원래 이미지 정보에 DCT를 적용하면 변환된 계수들을 얻는다. 이들 계수들은 코사인 함수에 따라 음이나 양의 값을 갖고 변화의 폭이 크기 때문에 절대값을 취하고 자연로그를 적용한 값으로 가시화하였다. 둘째 그림에서는 채널이라는 특정 패턴과 DCT의 특성 때문에 좌측 상위의 계수들이 큰 값들을 갖는다. 셋째로, 좌측 상위 행렬만을 선별한다. 마지막으로, IDCT를 수행하면 채널과 배경 간 경계의 뚜렷함은 약해지지만 패턴은 확실히 파악되는 이미지를 얻는다. 채널저류층 특성화 과정에서도 이와 같이 DCT를 적용하고 일부 DCT 성분만으로 채널특성을 파악할 수 있다.

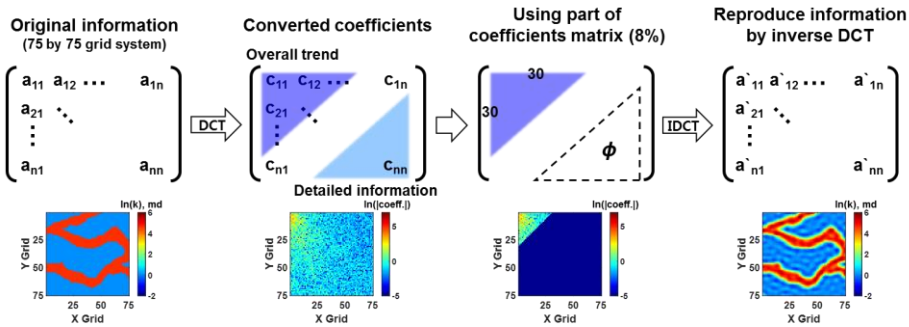
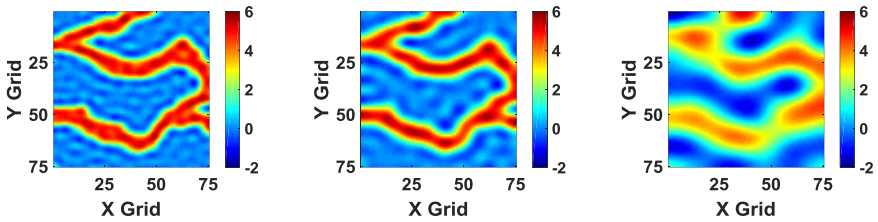


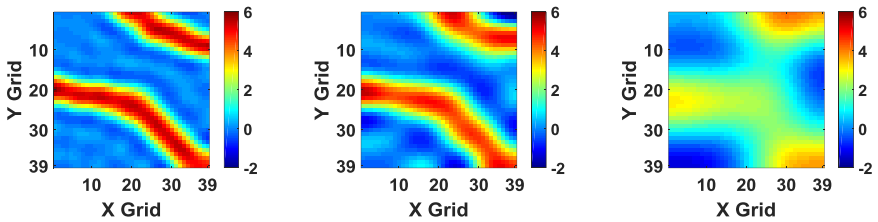
Figure 2.7 Example of DCT application on a channel reservoir model in 75 by 75 grid system.

DCT를 적용할 때 어느 부근의 성분을 이용하느냐에 따라 정보의 압축효율이나 세부적인 부분이 달라질 수 있다. Jafarpour와 McLaughlin(2007)은 계수의 크기 순으로 정렬하여 그 중 일정 수를 이용한 경우, 변환 성분들 중에서 좌측 상위 일정 수의 성분을 이용한 경우, 정보의 방향성을 파악하여 적합한 계수들을 이용한 경우를 비교하였다. 계수의 크기 순으로 정렬했을 때는 더 많은 계수를 쓸수록 실제 정보와의 오차가 감소하였다. 정보의 방향성을 파악한 경우는 좌측 상위 일정 부분을 아무 기준 없이 사용했을 때보다 채널 이미지를 더 효율적이고 세밀하게 나타낼 수 있었다.

Fig. 2.8은 저류층 유체투과율을 DCT계수 중 좌측 상위 대각 성분을 전체 중 몇 퍼센트 사용할 때 적절히 나타낼 수 있는가를 보인다. Fig. 2.8a~c는 75×75 격자, Fig. 2.8d~f는 39×39 격자이다. (c)와 (f) 에서는 1%만으로 채널패턴을 명확히 파악하기가 힘들고 (b)와 (e)의 4%로 패턴은 확인되지만 배경과 채널 간의 경계가 모호하다. (a)와 (d)의 8%에서는 채널의 특성인 연결성과 패턴 모두 확인할 수 있다. 본 연구에서는 가로와 세로의 방향성을 모두 고려한 안정적 성분의 비율은 전체 중 8% 정도이다.



(a) 8% (b) 4% (c) 1%



(d) 8% (e) 4% (f) 1%

Figure 2.8 Sensitivity analysis for the amount of DCT coefficients used for channel reservoir images: (a)~(c) 75 by 75 grid system, (d)~(f) 39 by 39 grid system.

2.4 암상비율보존법

채널은 강이나 계곡을 따라 비슷한 입자들이 퇴적되어 나타나는 지형이다. 이러한 특징 때문에 채널지형은 여러 암상을 갖는다. 암상이란 특정한 성질을 갖는 암체를 의미한다. 같은 암상이라면 다른 위치의 암석끼리도 유사한 특성을 가질 가능성이 높다. 따라서 같은 채널 내에서는 직관적으로 비슷한 석유물리적 특성을 예상할 수 있다.

암상비율보존법은 암상비율을 안다고 가정했을 때 그 비율을 일정하게 유지하여 저류층 모델 내에서 각 격자에 암상을 할당하는 기법이다. 암상의 비율은 지질학적 개념, 기존의 탐사자료 등으로부터 추정할 수 있다. 광구의 탐사나 개발과정에서 얻은 모든 자료는 정도의 차이가 있지만 불확실성을 갖고 있으며 추정된 암상비율 또한 마찬가지이다. 하지만 PFR은 암상비율의 불확실성에도 특성화 개선 성능에 큰 영향 없이 신뢰성 있는 결과를 보여준다(Kim *et al*., 2016).

Fig. 2.9는 PFR이 적용된 하나의 예를 제시한다. 처음 그림은 DCT를 이용한 저류층 특성화 결과 중 임의로 뽑은 하나의 모델이다. DCT를 이용했기 때문에 대략적인 채널패턴은 보이지만 연결할 곳은 연결하고 끊을 곳은 끊는 미세조정의 성능이 부족하고 오버슈팅과 언더슈팅의 문제가 있다.

PFR의 적용과정은 다음과 같다. 첫째로, 격자의 유체투과율 값을 모두 내림차순으로 정렬한다. 예와 같이 75×75 저류층이라면 총 5,625개 격자의 유체투과율 값을 가진다. 5,625개의 값을 정렬하고 해당 저류층에서 갖는 암상을 할당한다. 본 연구에서 채널은 사암으로 100 md, 배경은 세일로 1 md의 유체투과율을 갖는다고 설정하였다. 즉, 높은 유체투과율이라면 채널인 사암을 할당하고 작은 값이라면 세일을 할당한다. 사암과 세일이 할당된 각 격자들의 유체투과율 값은 일괄적으로 100과 1로 설정된다. 결과는 마지막 그림과 같이 사암 또는 세일로 구분되는 저류층 모델이 된다.

적용결과에서 볼 수 있듯이 오버슈팅과 언더슈팅이 해결되고 대략적인 채널패턴까지 인식할 수 있다. 이어질 부분과 끊어질 부분이 명확해져 그 연결성이 파악된다. EnKF에서 매번 모델들을 교정할 때마다 PFR을 적용한다면 채널패턴에 대한 빠른 파악 및 오버슈팅과 언더슈팅의 해결을 기대할 수 있다.

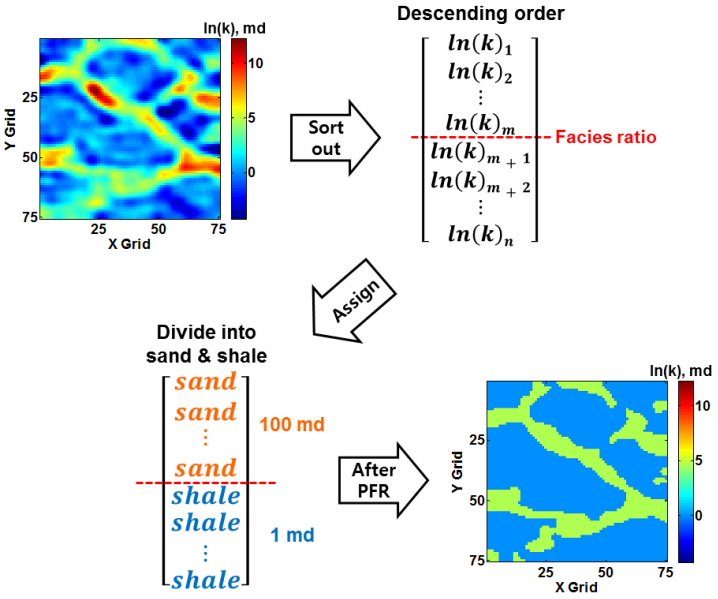


Figure 2.9 Example of PFR in a 75 by 75 channel reservoir model.

2.5 제안방법

본 연구에서는 대수층 동반 채널가스저류층 특성화에 적절한 최종 기법을 제안한다. 2.1~2.4장에서 설명된 기법들을 다음과 같은 과정으로 통합하여 제시한다.

1) IEDS를 이용하여 신뢰성 있는 초기모델을 생성한다.
2) EnKF로 특성화 수행을 시작한다(예측 및 교정). 먼저 전이모델(Eclipse 100)을 이용해 생산거동을 예측한다.
3) 저류층 모델들의 유체투과율은 DCT계수들로 변환되어 대표되며 이들을 EnKF에서 교정한다.
4) 교정된 DCT계수들을 IDCT로 역변환하여 유체투과율 값을 얻는다.
5) PFR을 적용하여 한 번의 교정과정을 마무리한다.
6) 위의 2~5 과정을 사용자가 설정한 시점까지 반복한다.
7) 최종 교정된 저류층 모델들의 미래 생산거동을 예측한다.

Fig. 2.10은 위의 과정을 그 예와 함께 구체적으로 보여준다. 위 과정과 부합되도록 그림에서도 번호로 나타내었다. 빨갛게 표시된 부분은 EnKF에 외에 추가로 제시하는 기법들을 의미한다. 그 외의 과정들은 EnKF에서 본래 수행하는 것들이다. 음영 표시된 부분은 EnKF의 예측 및 교정이 반복되는 부분을 뜻한다.

전반 과정을 예시 모델들과 설명하면 다음과 같다. 1, 2번에서 IEDS로 초기 앙상블 생성 후 전이 시뮬레이션을 수행한다. 3번에서 저류층 모델들을 DCT로 변환하고 패턴을 파악하는 핵심정보들을 사용하므로 그림과 같이 채널특성을 파악할 수 있다. 4번에서 DCT계수로 대표되는 저류층 모델을 교정하고 5번의 IDCT를 적용하면 예들과 같이 유체투과율 교정결과를 얻는다. EnKF는 채널의 연결성이나 패턴과 상관없이 작동하므로 채널특성들이 지켜지지 않는다. 6번에서 PFR을 적용하고 전반 과정을 반복하여 7번에서 최종결과를 얻는다.

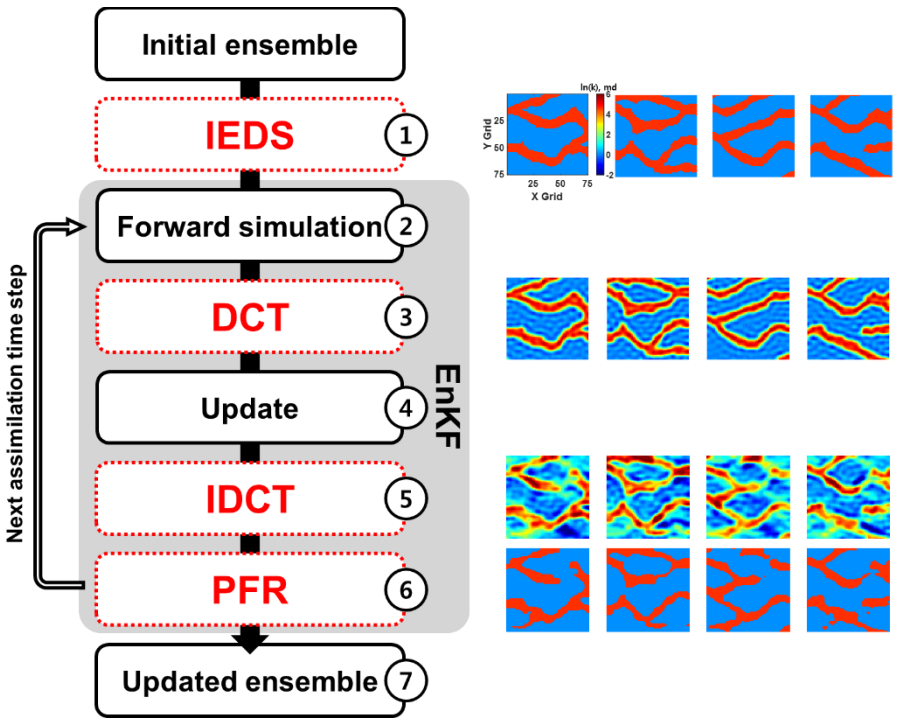


Figure 2.10 Overall procedures of the proposed method with examples.

3. 제안방법의 적용 결과

제안방법을 적용하기 전에 IEDS 설계 시 두 개의 인자(선별모델의 수, 정적자료 격자수) 수의 적절한 설정과 안정성 검증을 위해 그에 대한 민감도분석을 케이스 3의 저류층에서 수행하였다. 400개 앙상블 중 선별모델의 수를 30, 50, 70, 100으로 변화시키고, 추가로 사용하는 정적자료의 격자수를 100, 200, 300, 400으로 변화시켜 총 16개 경우의 특성화 성능을 분석하였다.

분석결과를 유체투과율 분포와 물 누적생산량에 대해 그래프로 도시하고(Figs. C.1, 2), 모든 평가인자의 RMSE를 평균하여 계산하였다(Table C.1). 대부분 DCT와 PFR 조합결과보다 낮은 RMSE를 보였으며 자세한 논의는 부록 C에서 다루었다. 민감도분석을 바탕으로 안정된 성능을 보이는 인자 설정의 IEDS를 케이스 1~4에 일관되게 적용하였다.

IEDS뿐만 아니라 전체 기법이 통합된 제안방법의 수행성능과 신뢰성을 검증하기 위해선 다양한 케이스에 안정적으로 적용이 가능한지 보여야 한다. 따라서 본 연구에서는 다음의 4개 케이스에 대한 적용결과를 제시한다.

1) 대수층이 없는 2차원 채널가스저류층.

2) 대수층 동반의 2차원 채널가스저류층.

3) 대수층 동반의 보다 큰 2차원 채널가스저류층.

4) 대수층 동반의 3차원 채널가스저류층.

4개 케이스 중 1, 2번에 쓰인 채널가스저류층과 시뮬레이션 조건은 Table 3.1과 같다. 교정은 다섯 시점의 관측자료를 이용한다. 예측 및 평가 결과로 보일 수 있는 것들은 대수층 유무에 상관없이 물과 가스 생산량, 물과 가스 누적생산량, 유체투과율이다. 대수층이 존재하는 경우는 추가로 MULTPV의 평가결과를 볼 수 있다.

Fig. 3.1은 전체 시뮬레이션과 교정과정을 도식적으로 보여준다. 저류층 모델은 700일부터 3500일까지 700일 간격으로 교정되고 그 이후 7,000일까지 저류층의 생산거동을 예측한다. 이는 4개의 케이스 모두에서 같다. 채널저류층 모델들은 SNESim을 이용하여 생성하였으며 이를 위해 필요한 트레이닝이미지는 Table 3.2의 조건을 만족하며 Fig. 3.2와 같다. Fig. 3.3은 케이스 1과 2의 참조필드이며 대각선으로 두 개의 채널을 갖는다.

Table 3.1 Reservoir model data and simulation conditions of cases 1 and 2

Parameters	Value
Reservoir grid system	39 by 39 by 1
Well locations, grid coordinate	(8, 8), (20, 8), (32, 8), (8, 20), (20, 20), (32, 20), (8, 32), (20, 32), (32, 32)
Observed data types	Well gas production rate, Well bottomhole pressure
Porosity, fraction	0.15
Initial water saturation, fraction	0.25
Initial reservoir pressure, psia	3,000
Bottomhole pressure limit, psia	1,000
The number of DCT elements	120 (7.9% of the whole)
Facies ratio of the reference field, fraction	0.3044 (sandstone)
Permeability, md	100 (sandstone), 1 (shale)

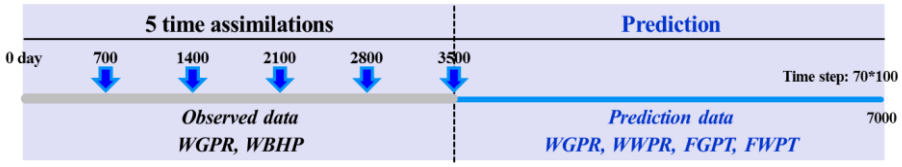


Figure 3.1 Assimilation times in the whole period.

Table 3.2 Conditions of TI generation for cases 1 and 2

Parameters	Value
Grid system	300 by 300 by 1
Sizes of grid cell, ft	250, 250, 100
Number of facies type	2
Geobody type	Sinusoid
Facies ratio, fraction	0.2 (sandstone), 0.8 (shale)
Width, cell	7
Orientation, degree	Uniform distribution (70-110˚)
Amplitude, cell	10
Wavelength, cell	120

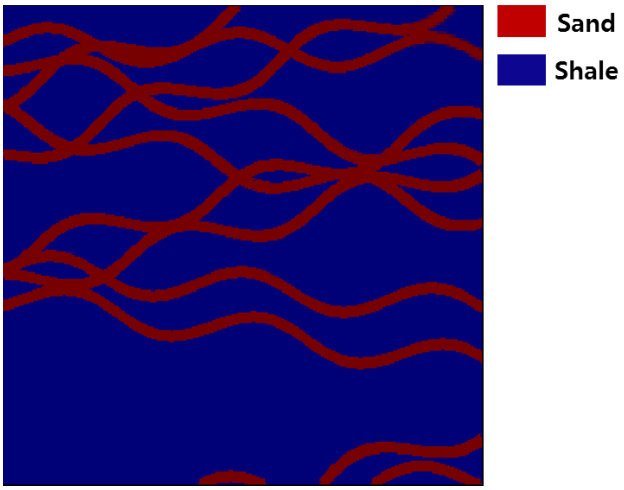


Figure 3.2 Training image of cases 1 and 2.

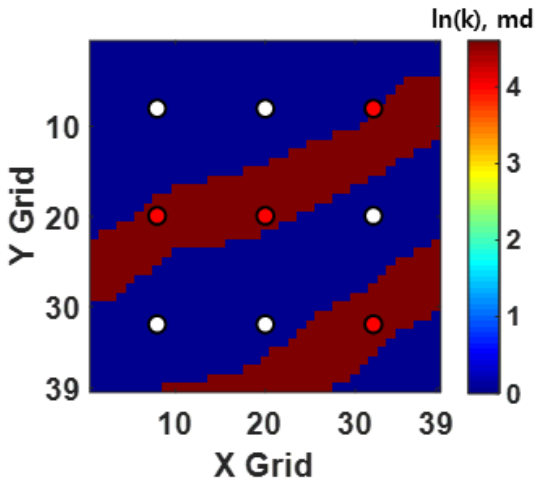


Figure 3.3 The reference field of cases 1 and 2.

케이스 3번의 채널가스저류층과 시뮬레이션 조건은 Table 3.3과 같다. 저류층 초기 압력, 공극률 등은 1, 2번 케이스와 동일하다. 격자의 수를 기준으로 했을 때 케이스 1, 2번 것에 비해서 약 4배의 격자를 사용하며 유정의 수는 9개에서 16개로 증가하였다. 모델생성에 쓰인 트레이닝이미지의 조건은 Table 3.4이며 Fig. 3.4와 같다. Fig. 3.5는 케이스 3의 참조필드이다. 8개 유정의 사암지점을 따라 주요 채널이 S자 모양으로 나있다. 사암의 비율은 전체 중 27.7%이다.

Table 3.3 Reservoir model data and simulation conditions of case 3

Parameters	Value
Reservoir grid system	75 by 75 by 1
Well locations, grid coordinate	(14, 14), (30, 14), (46, 14), (62, 14), (14, 30), (30, 30), (46, 30), (62, 30), (14, 46), (30, 46), (46, 46), (62, 46), (14, 62), (30, 62), (46, 62), (62, 62)
Facies ratio of the reference field, fraction	0.277 (sandstone)

Table 3.4 Conditions of TI generation for case 3

Parameters	Value
Grid system	250 by 250 by 1
Sizes of grid cell, ft	200, 200, 100
Number of facies type	2
Facies ratio, fraction	0.277 (sandstone), 0.723 (shale)

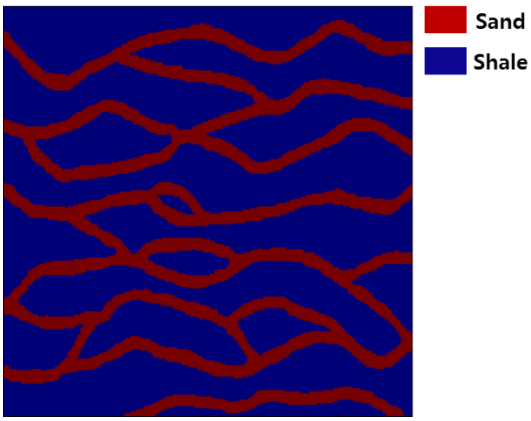


Figure 3.4 Training image of case 3.

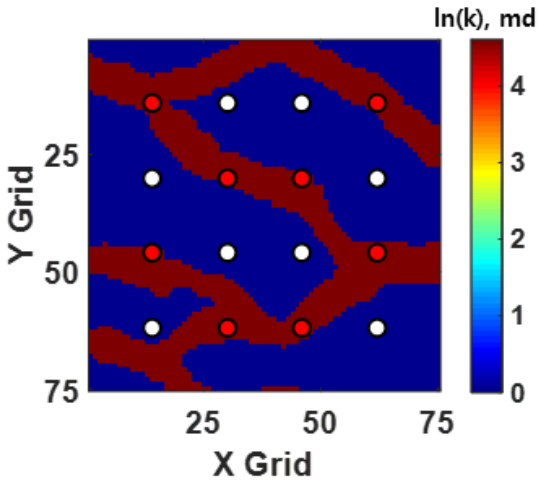


Figure 3.5 The reference field of case 3.

케이스 4번의 채널가스저류층과 시뮬레이션은 Table 3.5와 같다. 트레이닝이미지는 Table 3.6의 조건을 만족하며 Fig. 3.6과 같다. 저류층 모델은 케이스 1, 2와 마찬가지로 39×39 이지만 3개 층으로 구성된 3차원이다. 케이스 4의 참조필드는 Fig. 3.7과 같다. 대각선 방향으로 한 개의 큰 채널과 다른 하나의 작은 채널을 갖고 있다. 세 개의 층에서 큰 경향은 같지만 큰 채널의 왼쪽 부분에서 층별로 각기 조금씩 다른 특징을 보인다.

Table 3.5 Reservoir model data and simulation conditions of case 4

Parameters	Value
Reservoir grid system	39 by 39 by 3
Well locations, grid coordinate	(8, 8), (20, 8), (32, 8), (8, 20), (20, 20), (32, 20), (8, 32), (20, 32), (32, 32)
Initial reservoir pressure, psia	3,000 (L1), 3,008 (L2), 3,016 (L3)
Facies ratio of the reference field, fraction	0.2301 (L1), 0.2465 (L2), 0.3226 (L3)

Table 3.6 Conditions of TI generation for case 4

Parameters	Value
Grid system	200 by 200 by 5
Sizes of grid cell, ft	250, 250, 100
Number of facies type	2
Facies ratio, fraction	0.27 (sandstone), 0.73 (shale)

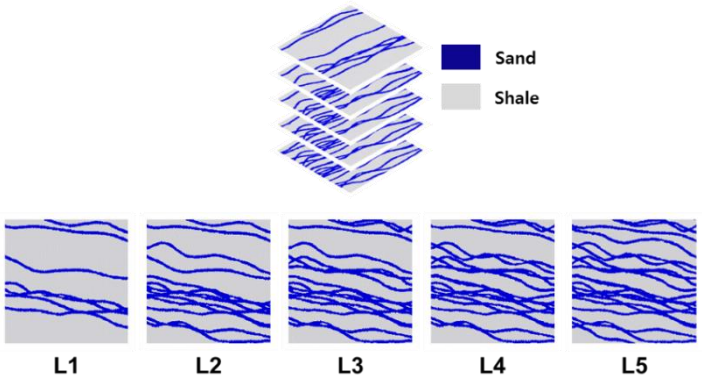
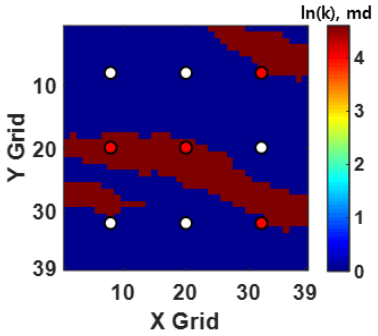
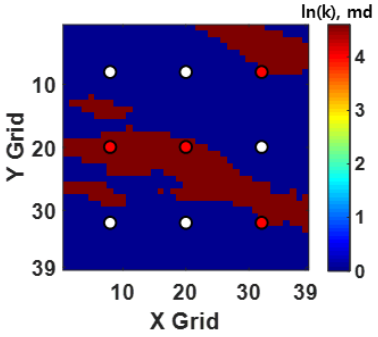


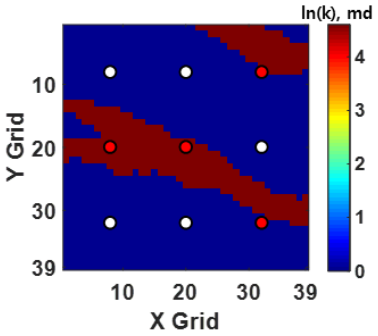
Figure 3.6 Training image of case 4.



(a) Layer 1



(b) Layer 2



(c) Layer 3

Figure 3.7 Three layers of the reference field in case 4.

3.1 대수층이 없는 2차원 채널가스저류층

4개의 케이스 결과들에 대해 다음 1~5의 순서로 제시한다. 다만 첫번째 케이스인 대수층이 없는 2차원 채널가스저류층에서는 물생산량이 거의 0에 가깝기 때문에 유정 별 물생산량 및 누적물생산량 결과와 대수층인자 평가는 제시하지 않는다.

1) 유정 별 물과 가스 생산량.
2) 물과 가스의 누적생산량.
3) 유체투과율 분포.
4) 교정된 유체투과율의 예.
5) 대수층 분포(MULTPV).

Fig. 3.8은 케이스 1에서 초기모델들의 가스생산량이다. 회색선은 모든 앙상블, 파란 선은 모든 앙상블의 평균, 빨간 선은 참조필드의 거동이다. 가스생산량의 조건을 10,000 Mscf/day로 설정했기 때문에 저류층압력이 충분한 초반에는 해당 생산량을 유지하다가 압력이 감소하면서 생산량도 함께 감소한다. Fig. 3.3에서 채널 위의 유정들(3, 4, 5, 9)은 초기의 일정한 생산량을 보이나 셰일 위의 유정들(1, 2, 6, 7, 8)에서는 대부분 생산 시작 직후에 감소 경향을 나타낸다. 대수층이 존재하지 않기 때문에 생산량의 불확실성이 작고, 같은 암상 위의 유정끼리는 생산거동의 차이가 크지 않다.

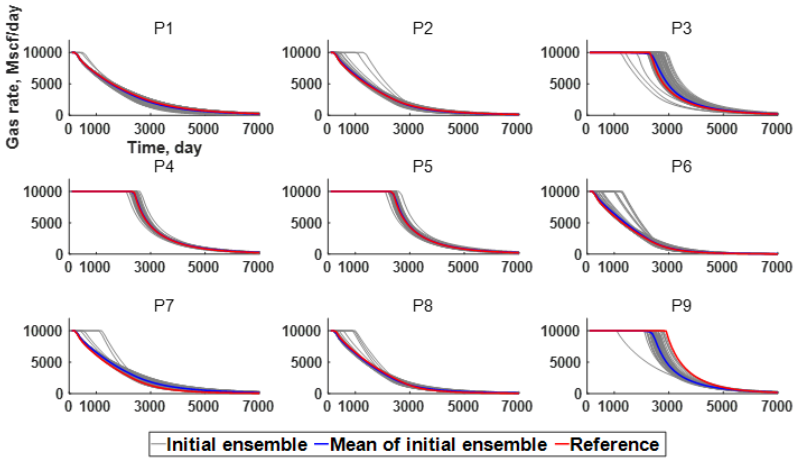


Figure 3.8 Gas well productions of initial ensemble in case 1.

Fig. 3.9는 대표적으로 유정 2, 5, 8번의 초기모델과 각 기법으로 교정된 모델의 가스생산량을 제시한다. EnKF는 다른 기법 없이 그 자체만을 적용한 것이고 나머지는 EnKF에 어떤 추가 기법을 사용했는지 나타내었다. 가장 오른쪽 밑의 결과는 본 연구의 제안기법의 결과이다. 유정 1~9번의 모든 결과들은 부록 B에 나타내었다(Fig. B.1).

Fig. 3.9에서 초기모델의 불확실성이 작고 그 거동이 복잡하지 않기 때문에 교정결과들은 참조필드의 경향을 잘 맞춰내고 있다. 다만 불확실성 평가결과의 차이가 거의 없으므로 기법 간의 성능차이를 비교하기 어렵다.

Fig. 3.10은 누적가스생산량의 결과이다. 초기모델에서 보면 누적생산량이 초기에는 빠르게, 후반으로 가면서 서서히 증가하는 경향이다. 교정된 모델들은 참조필드의 거동을 잘 따르고 있다.

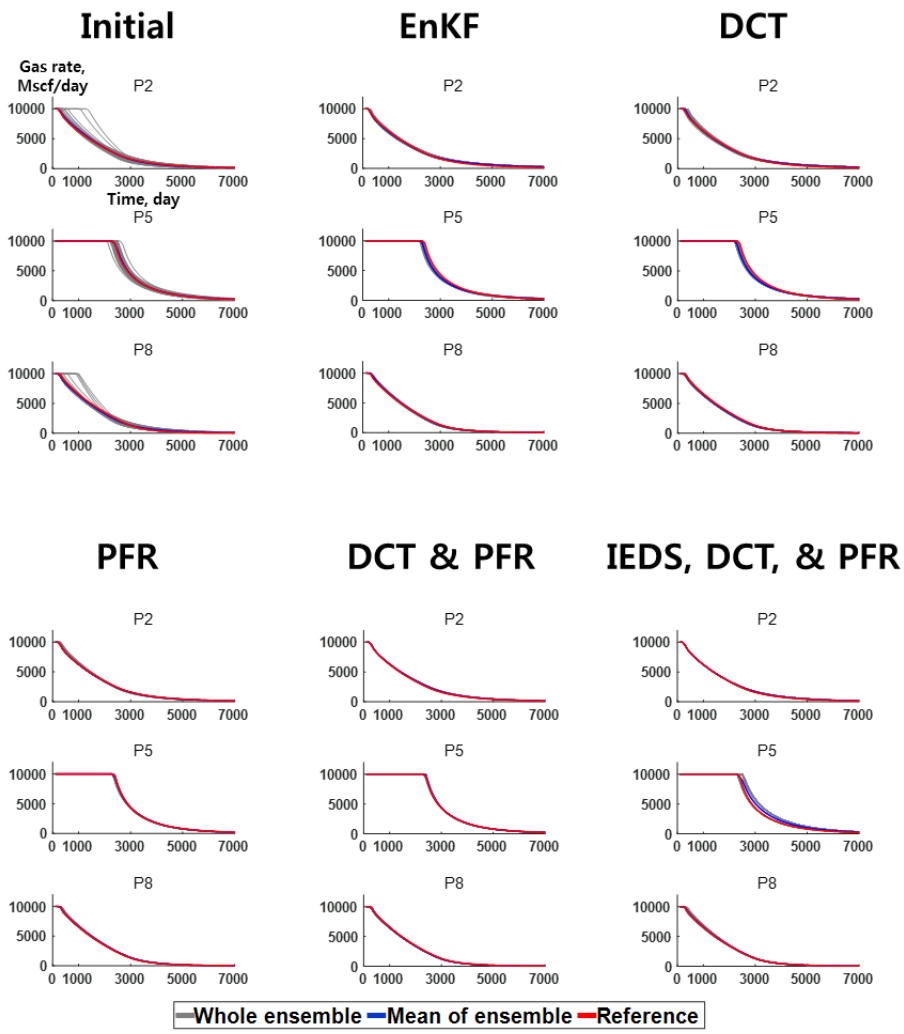


Figure 3.9 Updated results of gas well productions in case 1.

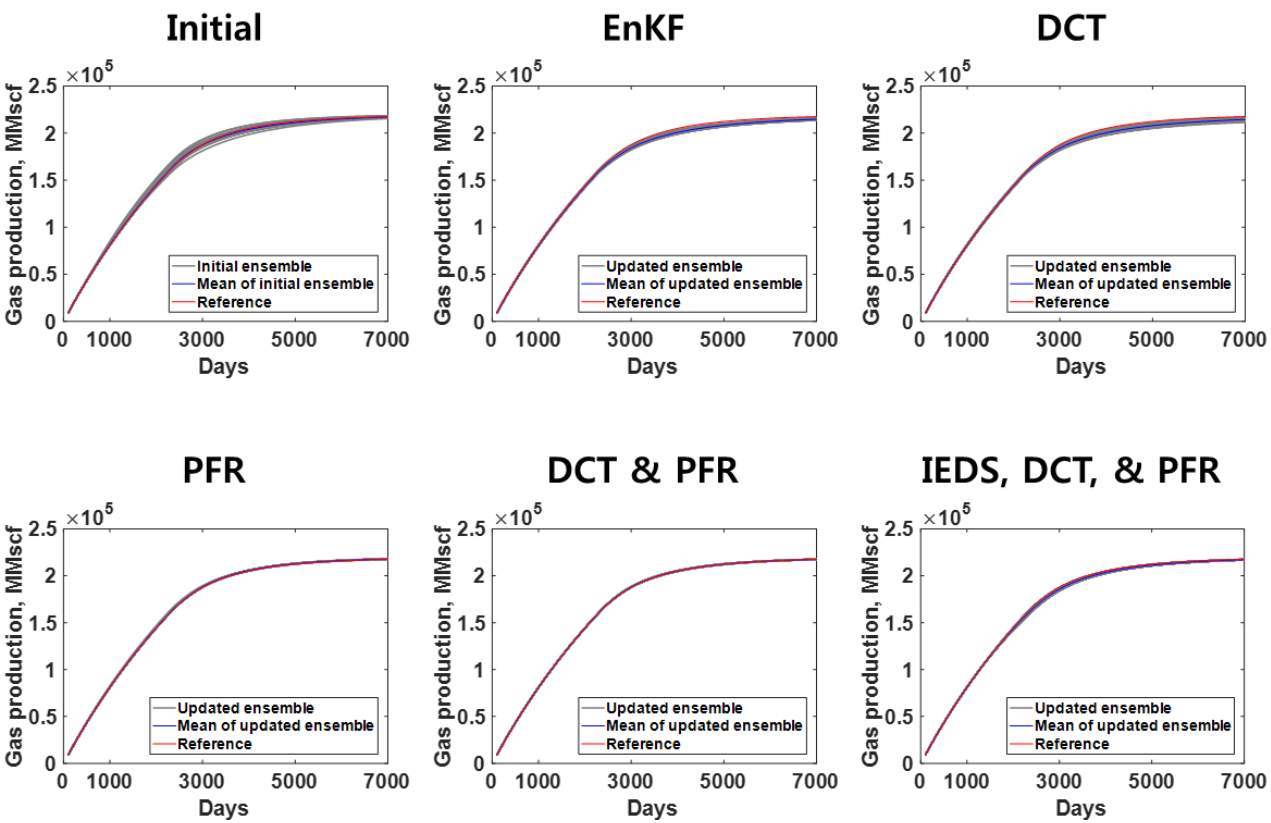


Figure 3.10 Updated results of total gas productions in case 1.

Fig. 3.11은 초기모델과 각 기법으로 교정된 모델의 유체투과율 평균을 히스토그램과 격자별 분포로 나타낸 것이다. 위의 행은 히스토그램, 밑의 행은 격자값의 평균이다. 첫 번째 그림은 참조필드이며 두 개의 대각선 채널을 보인다. 네 개의 검은색 유정의 암상은 사암이며 나머지는 셰일이다. 유체투과율 값의 스케일은 그림 내 모든 결과에서 같다.

초기 앙상블은 참조필드의 채널경향을 포함하고 있지만 다른 방향의 채널들과 혼재되어 있다. EnKF만을 이용한 결과는 참조필드의 경향을 대략적으로 반영하지만 연결성이 없고 경향의 정확성이 떨어진다. 게다가 교정된 유체투과율 값에서 오버슈팅과 언더슈팅이 발생한다. 격자들 중 자연로그 ln (k)가 최대 9, 최소 -4 정도의 값을 갖는다. 자연상수 e (2.71828…)의 9제곱과 -4제곱은 각각 8,103 md와 0.02 md이므로 본 연구에서 100과 1 md로 설정한 사암과 셰일의 값에 비해 너무 크거나 작다.

히스토그램에서 볼 수 있듯이 유체투과율 값의 경향이 이전보다 이봉분포에서 정규분포로 변하였다. 0을 중심으로 값들이 모여있고 5와 10 사이에 극단적으로 평가된 값들이 있다. 이전의 EnKF 연구결과들에서도 확인할 수 있지만, 본 결과에서 또한 EnKF 가정의 특성으로 인해 교정된 값들이 정규분포로 수렴하는 한계를 보인다. 이러한 EnKF의 특징 및 한계는 DCT 결과에서도 확인할 수 있다.

DCT 결과는 DCT 성분을 이용한 유체투과율의 교정이므로 EnKF만을 이용한 결과보다는 채널의 패턴과 연결성을 잘 보존한다. 참조필드의 두 줄기 채널과 유사한 경향을 보이며 그 외의 부분은 낮은 유체투과율 값으로 평가한다. 하지만 여전히 오버슈팅과 언더슈팅을 해결하지 못했다. 히스토그램에서 보이는 유체투과율은 EnKF의 결과와 크게 다르지 않다. 두 줄기의 채널 중 밑의 것에서는 그 연결성이 보장되지 못하며 위의 것에서도 연결성이 약해지는 부분이 보인다. DCT효과가 확연하지만 기법의 신뢰성이 아직 부족하다.

PFR은 암상비율을 지정하므로 히스토그램에서 정규분포가 아닌 이봉분포에 가까운 결과를 준다. 또한 사암과 셰일의 비율도 EnKF나 DCT만 적용한 결과와 비교했을 때 참조필드의 것과 훨씬 가까워졌다. 유체투과율의 격자 분포에서도 전반적인 참조필드 채널의 경향을 가지면서 성능개선을 확실히 보인다. 그럼에도 불구하고 주요 경향에서 일부 분리된 격자 값들이나 아직 사암인지 셰일인지 암상을 구분할 수 없는 부분들이 나타나 기법의 신뢰성을 확신할 수 없다.

DCT와 PFR 조합결과는 PFR보다 한층 더 개선된 특성화 결과를 준다. 히스토그램을 보면 사암과 셰일의 유체투과율 값 사이의 애매한 값들이 감소하고 셰일 값 쪽으로 이동함으로써 보다 확연한 이봉분포를 가진다. 뿐만 아니라 주된 경향인 두 채널 이외의 부분들이 정리되고 채널의 연결성이 보장됨을 알 수 있다.

이는 DCT나 PFR 개별적용으로는 보일 수 없는, 둘의 결합만이 제시 가능하ㄴ 성능이다.

DCT 결과에서 채널의 전반적인 경향은 파악되지만 채널과 배경의 경계, 사암과 셰일의 유체투과율 값, 채널 일부의 연결성 등 세밀한 부분에서는 부족함을 보였다. 반면, PFR 결과는 유체투과율 값과 그 경계는 파악했지만 연결성과 일부 값에서 매끄럽지 못한 분포를 가졌다. 이 두 기법의 장점이 결합되어 연결성, 패턴, 유체투과율의 값 모두를 고려한 신뢰성 있는 결과를 줄 수 있었다.

마지막의 IEDS, DCT, PFR을 모두 결합한 제안방법은 신뢰성 있는 유체투과율 평가를 보인다. 두 주요 채널은 참조필드의 것과 유사하며 히스토그램 상에서도 이봉분포를 잘 유지한다. 아직 저류층의 규모가 작고 대수층도 존재하지 않기 때문에 전반적인 불확실성이 크지 않아 IEDS로 인한 성능차이는 잘 드러나지 않는다.

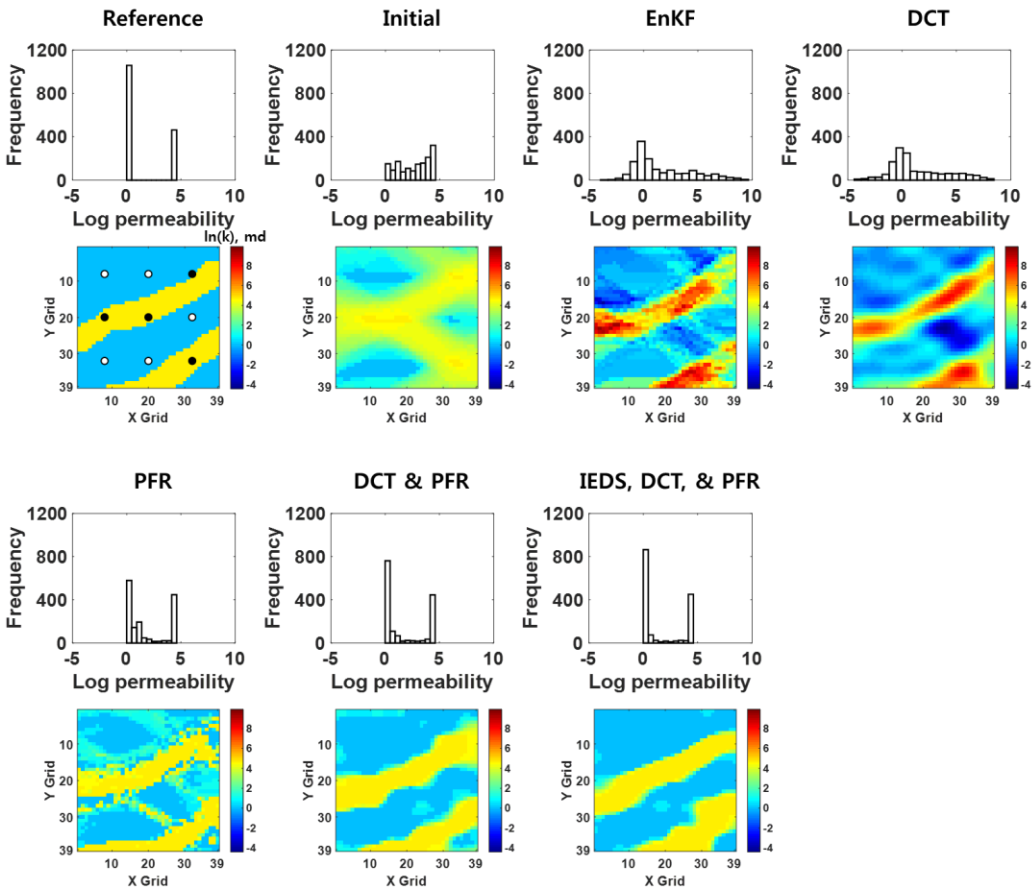


Figure 3.11 Characterization results of permeability distribution in case 1.

Fig. 3.12는 임의로 선택한 4개 앙상블멤버들에 대해 각 기법들로 얻은 특성화 결과들을 제시한 것이다. 마지막에서 두 번째 행은 IEDS로 생성한 새로운 초기필드들의 예이다. 제안방법에는 IEDS로 생성한 앙상블을 사용하고 나머지 기법들에는 첫째 행의 앙상블을 사용한다.

4개의 초기 앙상블은 비슷한 두께로 다양한 경로의 채널이 나있다. EnKF 결과를 보면 오버슈팅과 언더슈팅, 채널 연결성의 부재 등의 문제를 다시 확인할 수 있다. DCT 결과는 육안으로 전반적 패턴은 인식할 수 있지만 채널과 배경의 경계가 명확하지 않다. PFR에서는 일부 채널이 끊겨 있거나 사암이 있지 말아야 할 곳에 보이고 있어 해당 기법만으로는 만족스러운 결과를 얻을 수 없다. 나머지 마지막 두 기법의 결과는 참조필드의 패턴을 안정적으로 따르고 있다.

Table 3.7은 각 기법들의 성능을 비교하기 쉽게 정성적으로 평가한 것이다. 마지막 두 기법이 가장 좋은 평가결과를 가지지만 평가항목이 적어 기법 간 성능차이가 두드러지지 않았다.

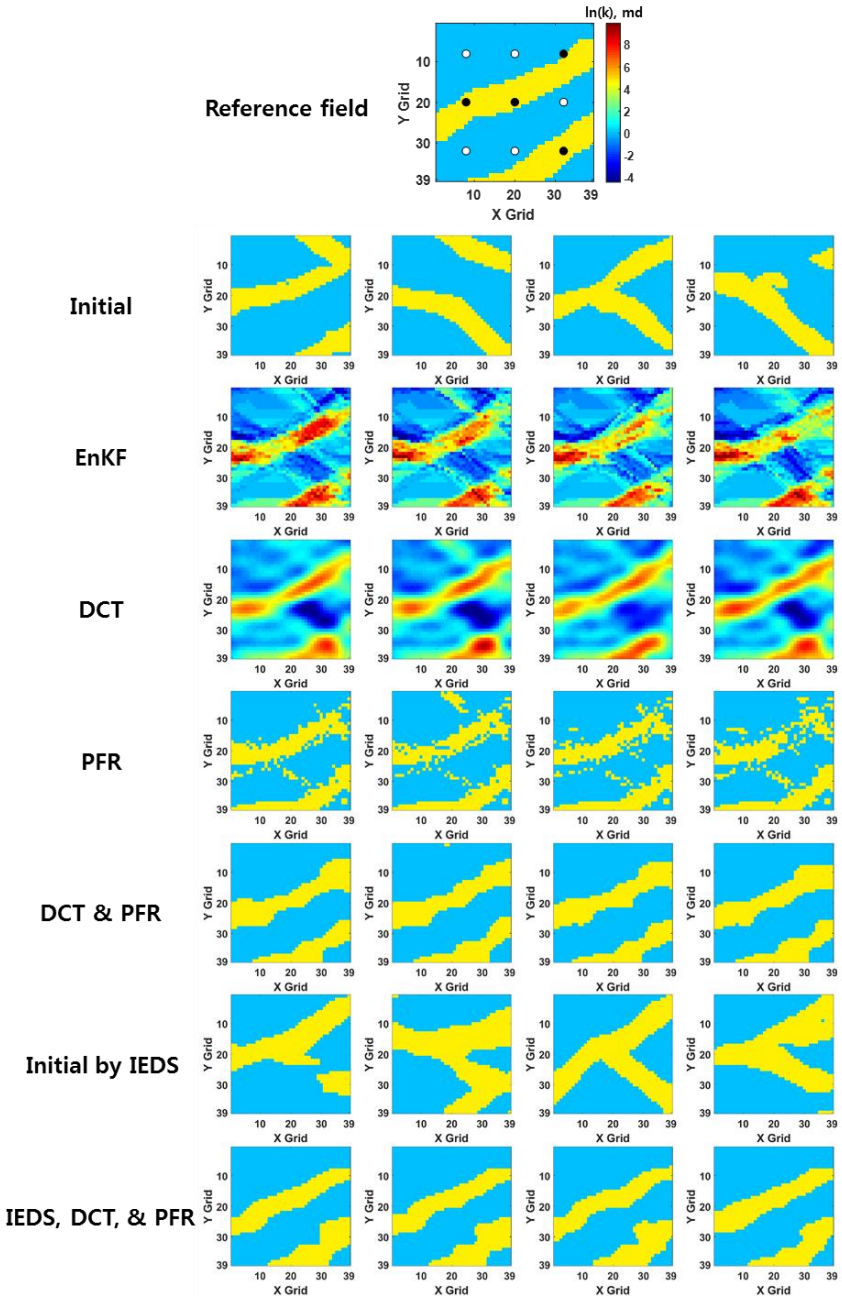


Figure 3.12 Examples of permeability distribution results in case 1.

Table 3.7 Comparison of each performance in case 1

Method	EnKF	DCT	PFR	DCT PFR	IEDS DCT PFR
Well gas rate	Good	Good	Good	Good	Good
Total gas rate	Good	Good	Good	Good	Good
Permeability	Poor	Poor	Fair	Good	Good

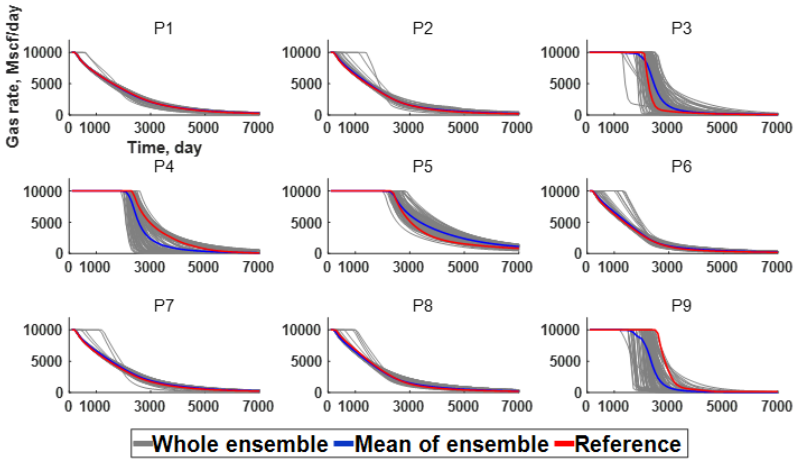
3.2 대수층 동반의 2차원 채널가스저류층

3.2.1 격자시스템이 39×39인 채널가스저류층

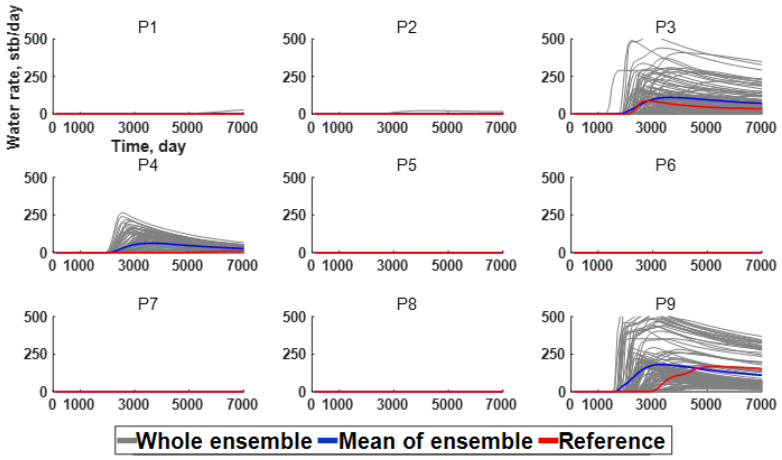
3.2.1에서는 케이스 2의 결과를 보인다. 대수층이 없는 케이스에 비해서 케이스 2는 상대적으로 불확실성이 증가함에 따라 특성화가 복잡하고 어려워진다. Fig. 3.13은 초기모델의 유정 별 가스 및 물 생산량이다. 대수층이 없는 경우와 비교했을 때 가스생산량이 크게 줄어들진 않았다. 하지만 이는 대수층에서 침입해 온 물을 모두 함께 생산한다는 조건이다. 경제적 관점에서는 물처리 비용까지 고려해야 하므로 물생산량의 거동을 함께 파악해야 한다.

케이스 1과 같이 채널 위의 유정에서는 가스생산이 어느 정도 유지되고 그 외 유정에서는 급격히 생산량이 줄어든다. Fig. 3.13b의 물생산량 단위는 STB/day이다. 가스와 마찬가지로 채널 위의 유정에서 생산을 보이고 그 외의 유정에서는 거의 0에 가깝다. 유정 5번은 채널 위에 있지만 위치가 정 중앙이므로 해당 시뮬레이션 기간인 7,000일까지는 물이 들어오지 않는다. 참조필드의 거동에서는 3번과 9번 유정 외에 물이 거의 생산되지 않는다.

가스와 물 생산량을 비교하면 그 불확실성에서 차이를 볼 수 있다. 물은 가스에 비해 선택적으로 유동하고 대수층인자의 불확실성까지 반영되므로 더 큰 불확실성을 보인다. 이는 모든 모델들의 거동을 나타내는 회색 선의 큰 밴드폭으로 드러난다.



(a) Well gas rate



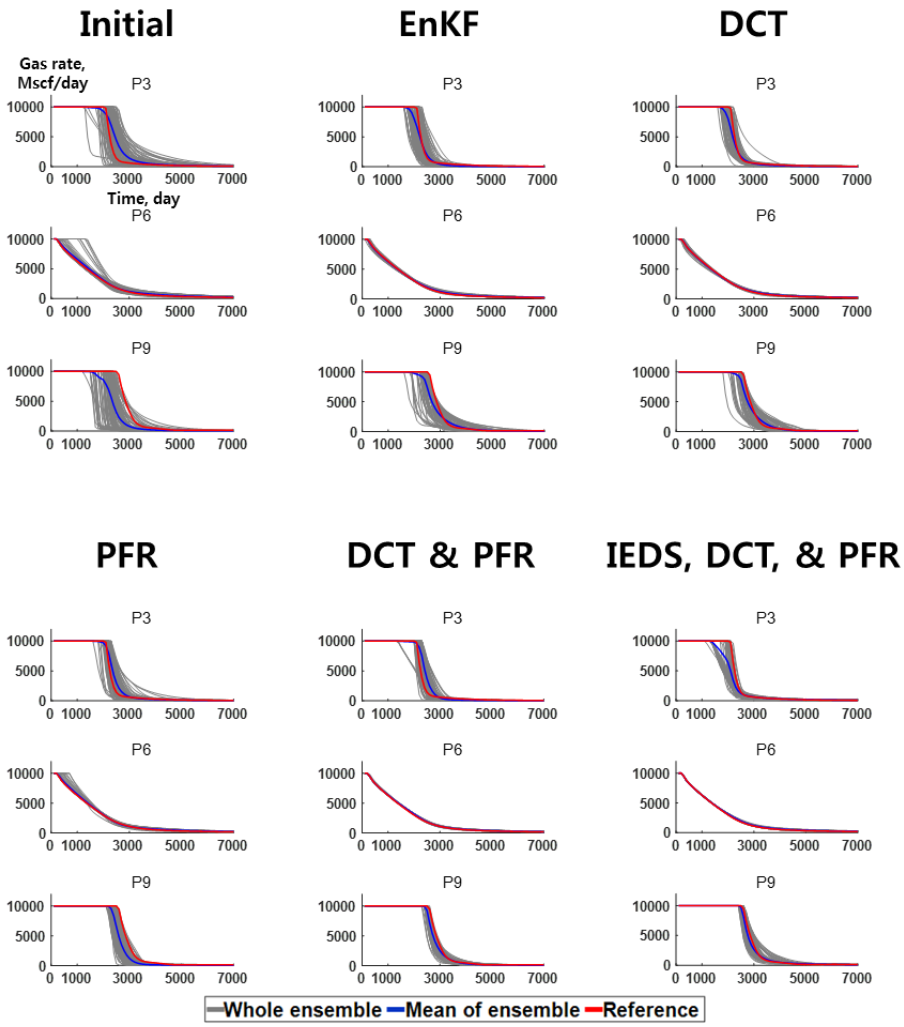
(b) Well water rate

Figure 3.13 Well gas and water productions of the initial ensemble in case 2.

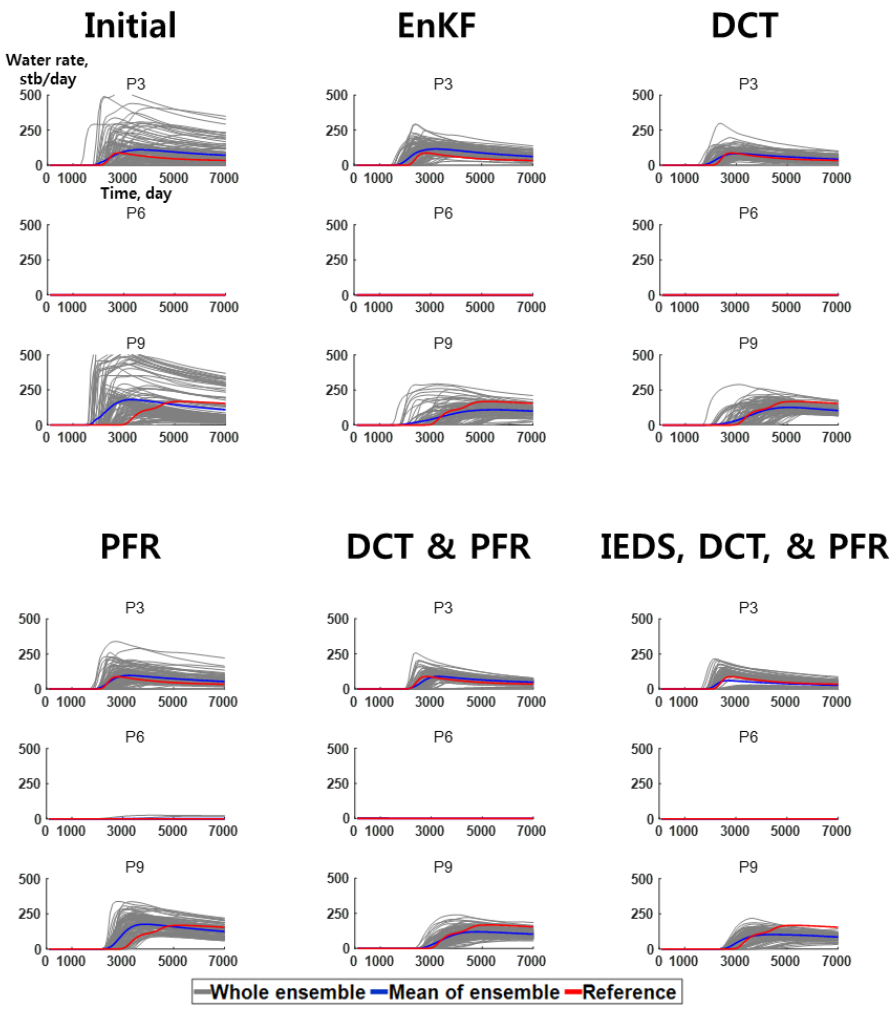
Fig. 3.14a에서 모든 가스생산량 예측들 간의 비교는 초기모델의 불확실성이 큰 유정 3, 6, 9번에 대해서만 보였다. 나머지 결과는 부록 B에 삽입하였다(Figs. B.2, 3). 모든 기법은 대체로 적절한 예측결과를 준다. 불확실성이 감소하면서도 교정된 앙상블 평균이 참조필드의 거동을 잘 따른다. 물생산량에 비해 불확실성이 작기 때문에 교정된 결과들에서도 큰 불확실성을 보이지 않는다.

Fig. 3.14b에서는 초기모델의 큰 불확실성 때문에 교정된 모델들의 불확실성이 가스거동에 비해 크다. 하지만 모든 기법들이 불확실성을 감소시키면서 유정에 물이 들어오기 시작하는 시점들을 적절하게 예측한다. 초기모델에서 보면 유정 3번과 9번에서 각각 약 2,000일과 3,000일쯤에 물이 생산된다. 유정에서 1,000 psi 공저압력 조건 외에는 물생산을 따로 제한하지 않으므로 유정의 물생산은 저류층에서 유정으로의 물 침입으로 볼 수 있다.

언제부터 물이 생산되는지 정확히 예측해야 대수층을 동반하는 가스저류층에서 생산운영을 어떻게 할지 적절한 의사결정을 할 수 있다. 평균거동인 파란색 선들은 대부분 물생산이 시작되는 지점을 맞추면서 그 거동 또한 잘 예측하고 있으므로 각 기법들이 특성화에 적절히 적용됨을 알 수 있다. 특히 마지막 두 결과들은 다른 결과들에 비해 불확실성을 현저히 줄이고 실제 저류층의 거동을 비교적 잘 따르고 있다.



(a) Well gas rate



(b) Well water rate

Figure 3.14 Updated results of well gas and water productions in case 2.

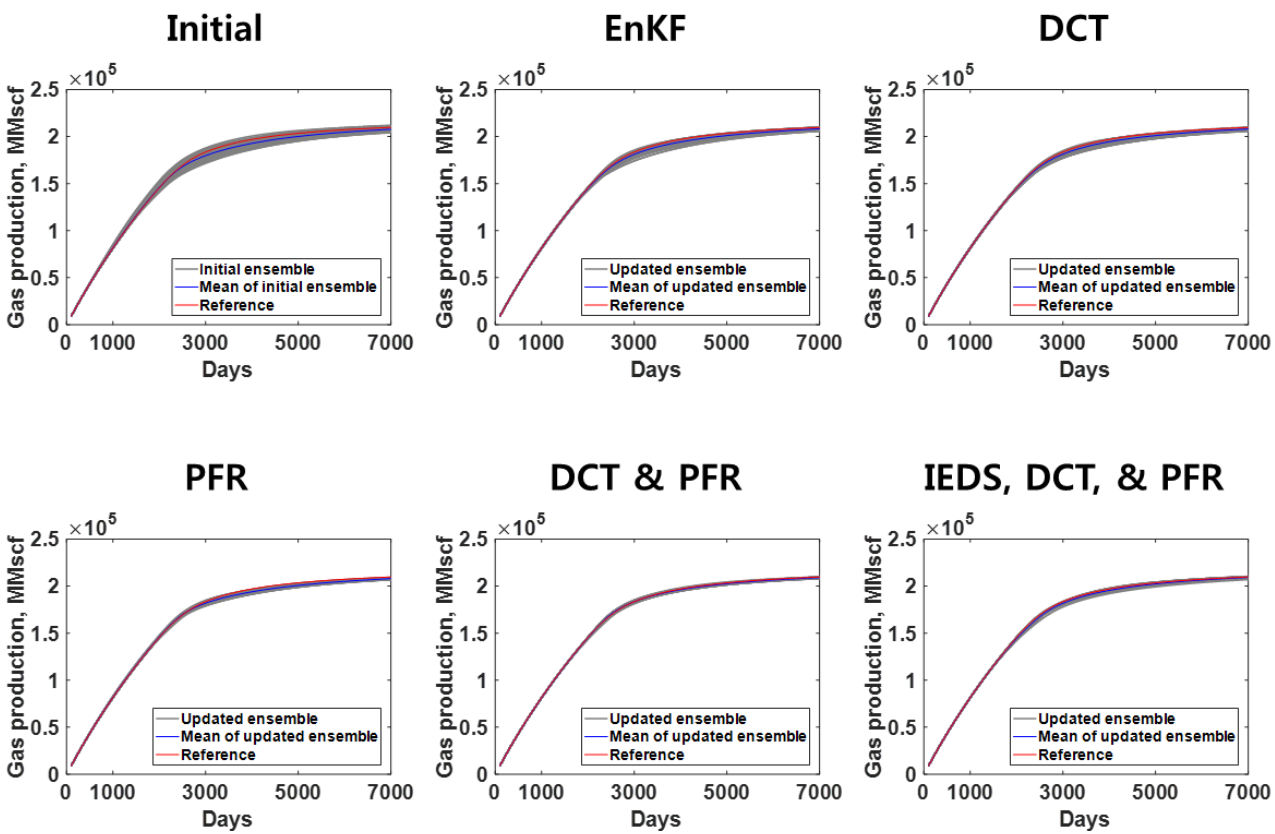
Fig. 3.15a는 누적가스생산량의 결과이다. 초기모델의 불확실성이 작기 때문에 교정된 결과 또한 더 줄어든 불확실성을 보인다. Fig. 3.15b는 누적물생산량이며 초기모델과 교정된 모델 모두 가스에 비해 큰 불확실성을 갖는다. 초기모델은 참조모델의 거동에 비해 누적물생산량을 과대평가한다. 각 기법들로 교정된 모델들은 대체로 불확실성을 감소시키고 평균거동이 참조모델의 것에 가까워졌다. 하지만 EnKF나 PFR만을 적용한 결과들은 여전히 생산량을 과대평가하고 그 불확실성 또한 크게 나타난다. DCT와 PFR을 조합한 결과와 제안방법의 결과는 모두 신뢰성 있는 불확실성 평가와 미래거동 예측을 보인다.

각 기법들의 결과는 Fig. 3.16의 유체투과율 특성화 결과와 함께 보면 더 쉽게 해석할 수 있다. 참조필드와 초기 앙상블은 케이스 1과 동일하다. EnKF 결과는 케이스 1과 마찬가지로 오버슈팅 문제, 분리된 채널, 참조필드엔 존재하지 않는 높은 유체투과율 지역을 보인다. EnKF와 DCT 결과 모두에서 유체투과율 값들이 한쪽으로 모여 정규분포 형태를 보이려 하는 한계점을 볼 수 있다.

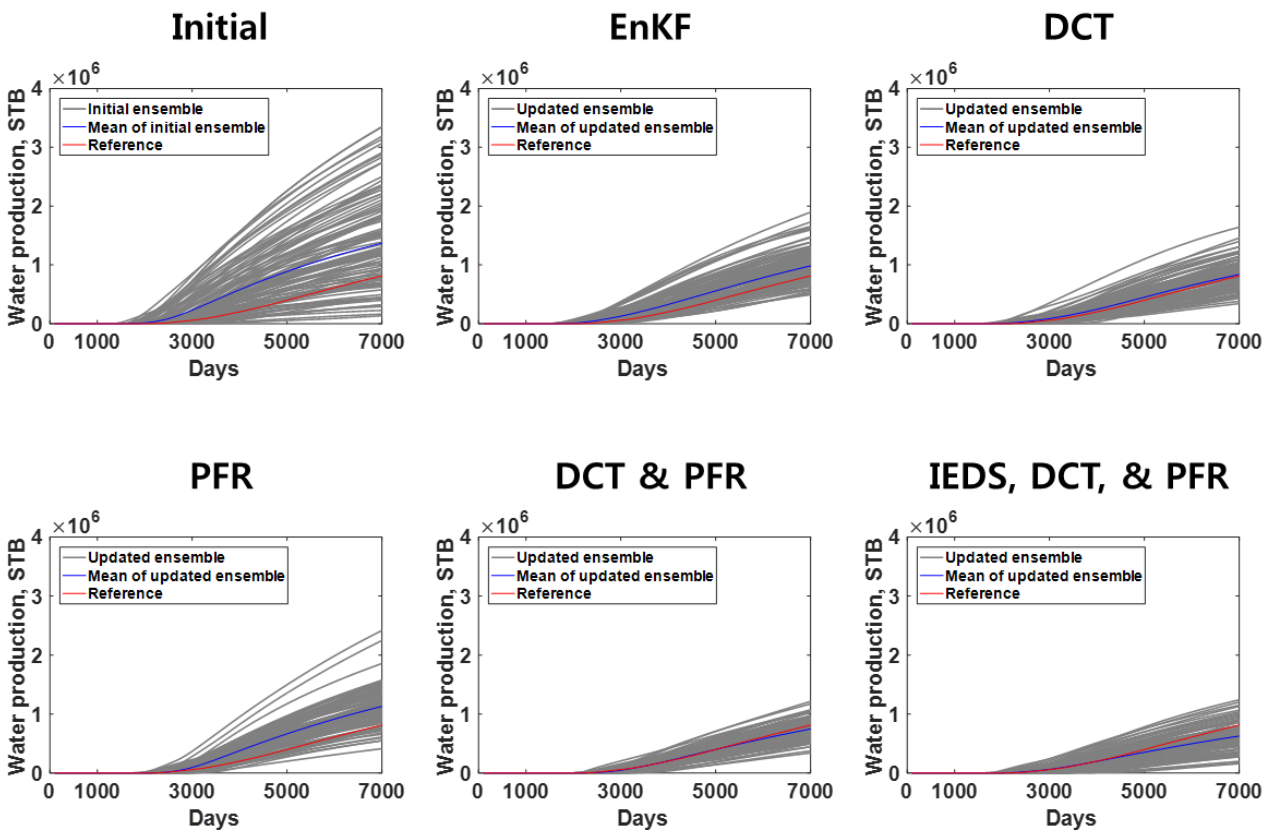
PFR 결과는 참조필드의 이봉분포에 더 가까워졌지만 더 적은 빈도여야 할 사암이 셰일보다 오히려 더 큰 값을 보인다. 이는 일부 앙상블 모델들이 참조필드와는 전혀 일치하지 않는 곳을 사암으로 평가하기 때문이다. 단순히 암상비율을 유지한다고 참조필드의 채널경향을 특성화할 수 있는 것이 아님을 시사한다.

PFR 결과는 세일이어야 할 부분들을 사암으로 특성화하여 결국 유체투과율을 과대평가하는 셈이 되었다. 이 때문에 대수층의 물이 실제 저류층보다 더 잘 유입되는 것으로 모사하였고 누적물생산량의 과대평가로 이어진다. DCT 결과는 채널과 배경의 경계가 모호하고 참조필드와는 다소 다른 유체투과율 경향들을 보인다. 하지만 전반적인 경향은 참조필드의 것을 잘 따르고 있기 때문에 누적물생산량 평가는 알맞게 이뤄졌다. 히스토리매칭은 잘 수행되었으나 필드의 특성화가 불완전하므로 전체적인 성능은 신뢰할 수 없다. EnKF 결과 또한 대략적인 경향은 맞추지만 부분부분의 오버슈팅 때문에 적절한 히스토리매칭이 수행되지 못했다.

마지막 두 결과는 참조필드의 주요 채널 두 곳을 모두 사암으로, 그 외의 부분은 셰일로 평가한다. 하지만 IEDS로 신뢰성 있는 초기모델들을 선별했기 때문에 마지막 기법이 보다 더 선명한 채널과 배경 간 경계를 제시한다. 참조필드의 경향을 안정적으로 평가하기 때문에 마지막 두 기법의 누적물생산량 예측 또한 신뢰성을 가진다.



(a) Total gas rate



(b) Total water rate

Figure 3.15 Updated results of total gas and water productions in case 2.

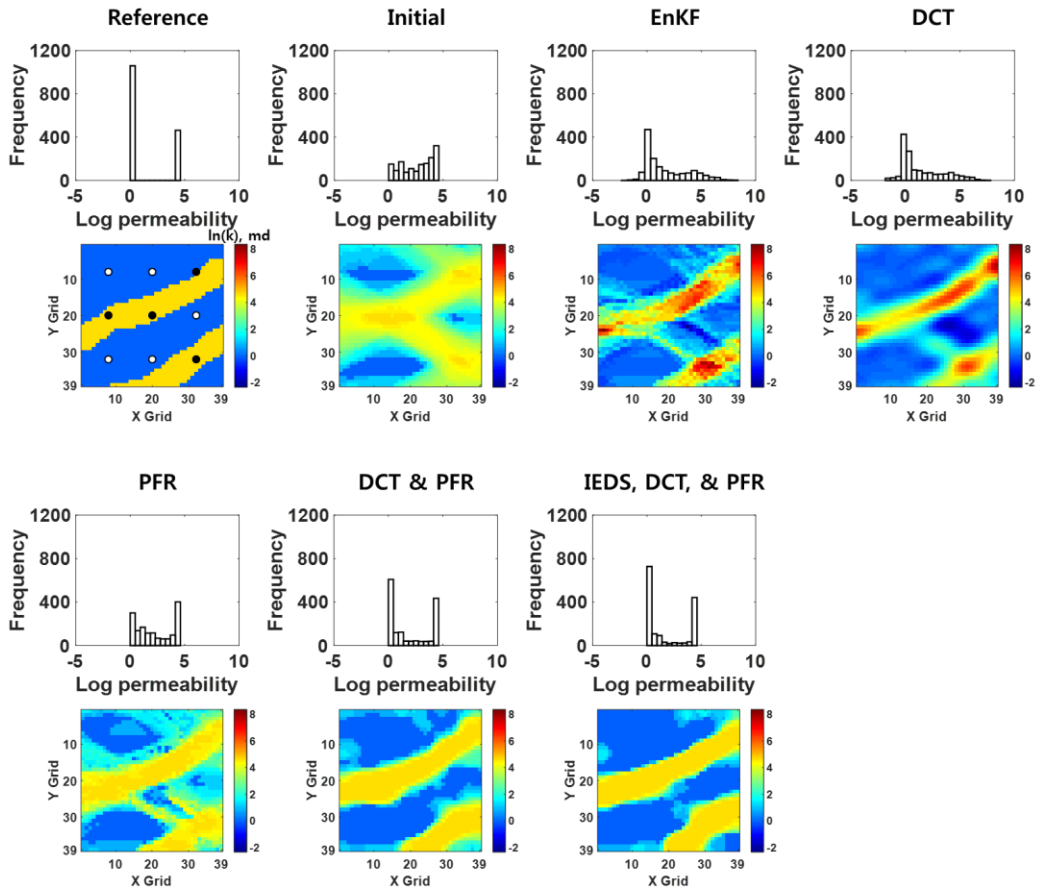


Figure 3.16 Characterization results of permeability distribution in case 2.

Fig. 3.17은 유체투과율 분포의 특성화 결과를 각 모델로 보인 것이다. 참조필드와 초기모델은 케이스 1과 같으며 Fig. 3.12와 비교할 수 있다. 각 기법들의 결과는 케이스 1의 결과와 유사하다. 여전히 EnKF는 오버슈팅, 부서진 채널 연결성, DCT는 채널의 세밀함 부족, PFR은 끊어진 채널 연결성에서 문제를 보인다. 마지막 두 기법은 미세한 부분들에서 차이가 있지만 참조필드와 같은 경향을 가진다.

Fig. 3.18은 대수층 강도의 평가결과이다. 평가된 대수층 강도를 북-동-남-서의 순서로 왼쪽에서부터 제시하였다. 초기모델에서 대수층 강도는 참조모델의 것에 비해서 북쪽과 동쪽은 대수층을 과소평가, 서쪽은 대수층을 과대평가한다. 회색 점선은 참조필드의 대수층 강도이며 평가한 값들을 비교하기 편하도록 그린 것이다.

식 (3.1)의 RMSE(root mean square error) 또한 왼쪽 열에 함께 제시하였다. 각 면의 대수층 강도에 대해 따로 계산하고 난 뒤 네 개의 값을 평균하여 최종 결과로 나타냈다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(MULTPV_{i,est} - MULTPV_{i,ref})^2} \tag{3.1}$$

식 (3.1)에서 i 는 몇 번째 모델인지, n 은 모델의 수, $MULTPV_{i,est}$ 은 평가된 대수층 강도, $MULTPV_{i,ref}$ 은 참조필드의 대수층 강도를 의미한다. 초기 MULTPV 값들은 불확실성을 고려하여 40에서 65 사이에 있도록 균일분포에서 무작위로 생성하였다. 이를 계산해보면 대수층의 부피가 전체 저류층의 공극부피를 기준으로 4에서 6.5배임을 의미한다. 균일분포를 보이던 초기 대수층인자들이 EnKF에 의해 모든 기법의 결과에서 정규분포와 유사해진다. 그 값이 설령 참값에서 멀어지더라도 EnKF의 특성 때문에 한 곳으로 수렴한다. 특성화를 적절히 수행하면 참값을 중심으로 불확실성 감소 효과를 기대할 수 있다.

EnKF만을 적용하여 얻은 MULTPV 값들은 대부분 과소평가되었다. RMSE 또한 거의 줄지 않았기 때문에 대수층 강도가 적절히 특성화되지 못했음을 알 수 있다. DCT는 대수층 강도를 과대 또는 과소평가하여 RMSE가 오히려 증가하였다. PFR은 북쪽과 서쪽에서 참값과 멀었던 값들을 가까이 오게 하지만 동쪽과 남쪽의 결과 때문에 여전히 RMSE에 큰 변화가 없다. DCT와 PFR 결합 결과는 동쪽과 남쪽에서 참값과의 차이가 있긴 하지만 불확실성과 RMSE가 감소하였다. 마지막의 제안방법은 북쪽을 제외하고 나머지 대수층 강도들이 참값으로 이동한다. 특히 동쪽에서는 모든 기법이 대수층 강도를 과소평가할 때 유일하게 그 값들을 참값 근처로 예측한다. 이로써 제안방법의 안정된 성능을 확인할 수 있다.

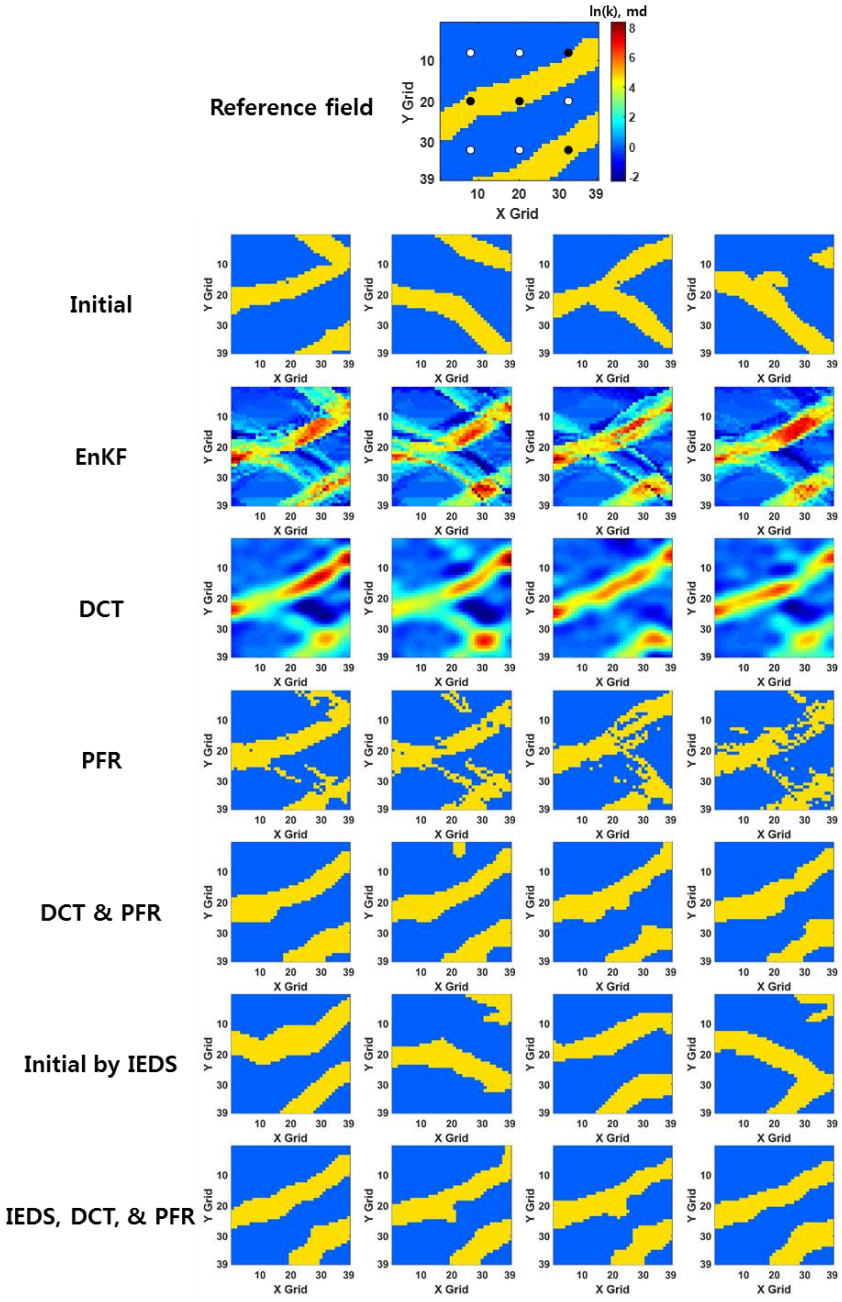


Figure 3.17 Examples of permeability distribution results in case 2.

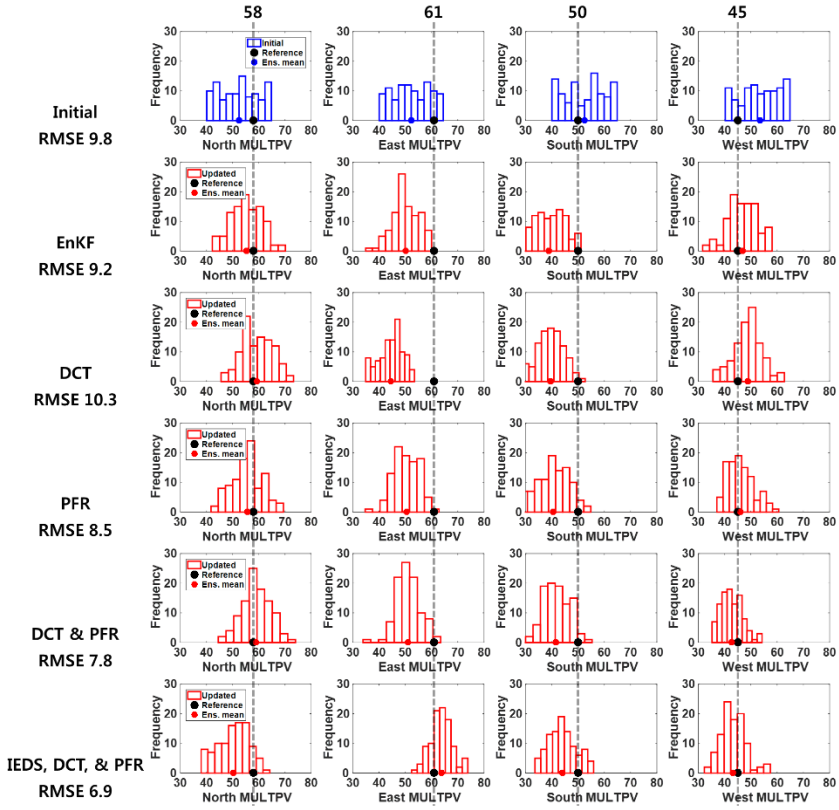


Figure 3.18 Characterization results of aquifer strengths in case 2.

케이스 1과 같이 모든 기법에 대해서 정성적 평가를 실시하였다(Table 3.8). 마찬가지로 마지막 두 기법이 뛰어난 성능을 보였다. 케이스 1과 달리 대수층인자가 추가되어 불확실성이 커졌지만 아직 두 기법의 차이는 부각되지 않았지만 두 기법 모두 안정된 성능을 보였다.

전반적인 성능차이의 이유는 EnKF, DCT, PFR의 기법들을 따로 적용할 시 발생하는 한계들 때문이다. 유정 별 가스생산량과 누적가스생산량의 예측은 성공하더라도 저류층 유체투과율 값에서 오버슈팅이 발생하거나 채널특성이 훼손될 수 있다. 이는 결국 편향된 대수층 강도 평가와 부적절한 물생산량 예측으로 이어진다. 따라서 서로의 약점을 보완하는 각 기법의 통합이 필요하다.

Table 3.8 Comparison of each performance in case 2

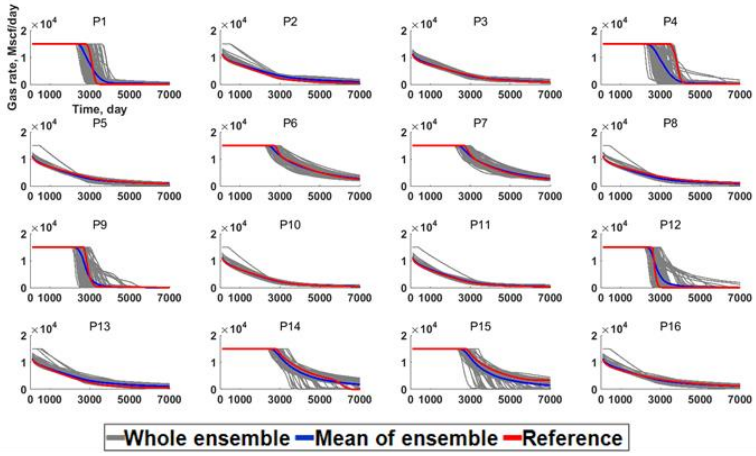
Method	**EnKF**	**DCT**	**PFR**	**DCT PFR**	**IEDS DCT PFR**
Well gas rate	Good	Good	Good	Good	Good
Well water rate	Fair	Fair	Fair	Good	Fair
Total gas rate	Good	Good	Good	Good	Good
Total water rate	Poor	Fair	Poor	Good	Good
Permeability	Poor	Poor	Fair	Good	Good
MULTPV	Poor	Poor	Fair	Fair	Good

3.2.2 격자시스템이 75×75인 채널가스저류층

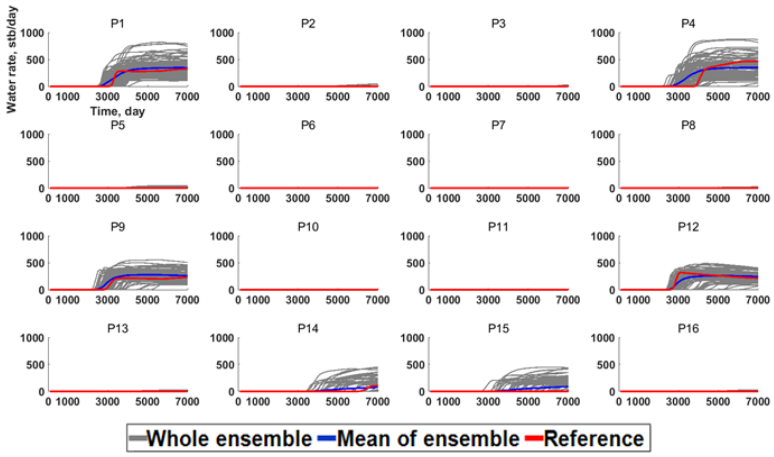
케이스 3은 케이스 1, 2와 달리 격자 75×75의 더 큰 저류층으로, 복잡한 채널경향과 연결성을 가지며 유정의 수도 많다. 따라서 불확실성이 증가하여 특성화의 어려움은 커진다. 이러한 저류층에서는 특성화 기법을 보다 엄격하게 평가할 수 있다.

Fig. 3.19는 초기모델의 각 유정에서의 가스 및 물 생산량이다. Fig. 3.5의 참조모델을 보면 알 수 있듯이 S자로 채널이 형성되어 있기 때문에 채널 위에 있는 유정들(1, 4, 6, 7, 9, 12, 14, 15)에서는 활발한 가스 및 물 생산을 보인다. 다만 유정 6번과 7번에서는 물생산량이 보이지 않는데, 이는 중앙 쪽에 위치하여 설정된 시뮬레이션 기간 동안 대수층의 물이 도달하지 않기 때문이다.

참조모델과 초기모델을 비교해 보면 특히 유정 4번에서 거동의 큰 차이를 보인다. 가스생산량에서는 생산량이 감소하는 시점을 맞추지 못하며 물생산량에서는 물이 들어오는 시점을 너무 이르게 예측한다. 불확실성이 크고 참조모델의 거동과 차이를 보이는 유정들의 거동을 분석하는 것이 각 기법들의 성능비교에 수월하므로 오른쪽 끝의 유정 4, 8, 12, 16의 결과들을 제시한다. 나머지 모든 유정에 대한 결과는 부록 B에 수록하였다(Figs. B.4, 5).



(a) Gas well rate



(b) Water well rate

Figure 3.19 Well gas and water productions of the initial ensemble in case 3.

Fig. 3.20a는 가스생산량 예측결과이다. 앞서 언급했듯이 초기모델에서 유정 4번과 12번이 큰 불확실성을 보이는데 EnKF는 이런 불확실성을 오히려 증가시키고 있다. 앙상블의 평균 또한 참조필드와 전혀 일치하지 않는다. DCT 결과는 EnKF와 달리 불확실성을 감소시키지만 역시나 4번과 12번에서 평균거동이 참조필드 거동을 완전히 빗나간다. 12번 유정처럼 가스생산량이 조기에 감소한다고 평가하면, 잘못된 운영결정으로 너무 이른 시기에 생산을 중지하게 될 수 있다.

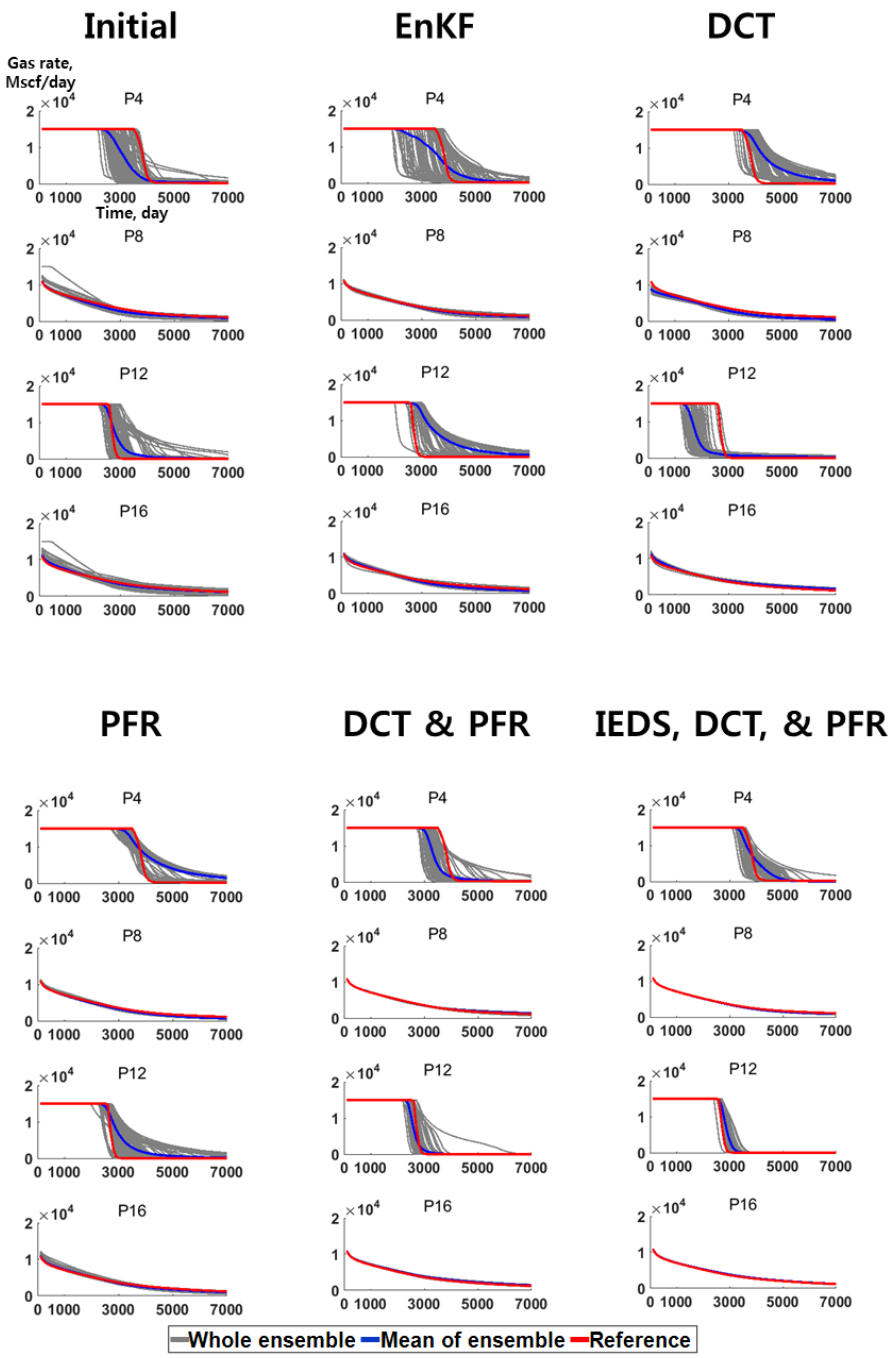
PFR은 비교적 평균거동이 실제 필드와 가까워졌지만 여전히 참조필드의 거동과 일치하지 않는다. DCT와 PFR 결합기법은 앞의 기법들보다 예측성능이 개선됐지만 4번 유정에서의 예측이 아직 참조필드 거동과 다르다. 제안방법은 생산량의 감소 지점을 정확히 예측하고 불확실성을 적절히 감소시키므로 그 안정성이 확인된다.

유정 8번과 16번은 셰일 위에 위치한다. 이는 SNESim에서 초기 앙상블을 생성할 때부터 정적자료로 반영되기 때문에 초기모델들 또한 두 유정의 부근을 셰일로 나타낸다. 채널이 아닌 셰일 지역은 대수층 물이 유입되지 않고 가스 또한 거의 생산되지 않기 때문에 불확실성이 반영될 여지가 없다. 따라서 단순한 거동을 보이며 히스토리매칭도 어렵지 않게 이루어져 작은 불확실성을 보인다.

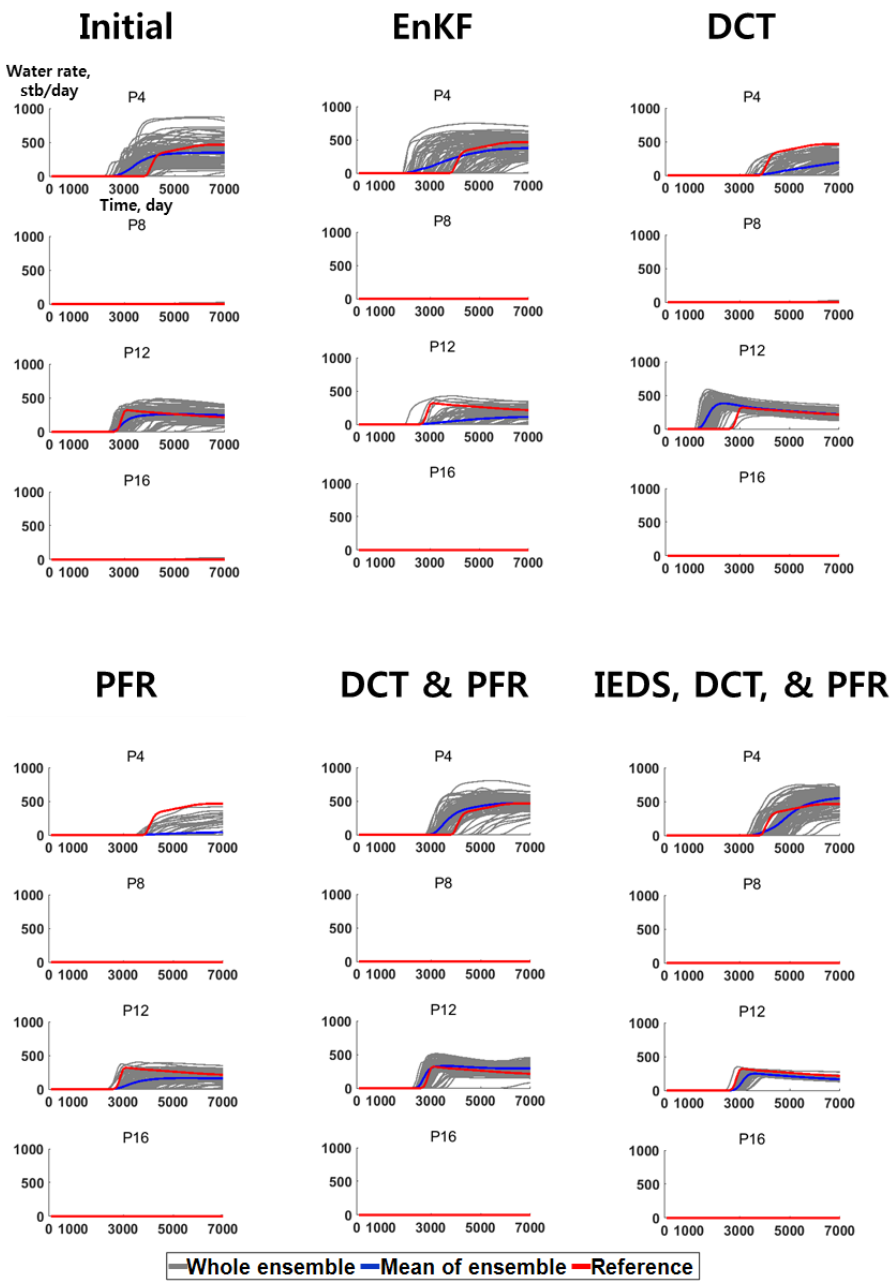
Fig. 3.20b는 물생산량의 예측결과이다. 가스와 마찬가지로 유정 4번과 12번에서 큰 불확실성을 보인다. 4번 유정에서는 4,000일쯤에, 12번 유정에서는 3,000일쯤에 물생산이 시작된다. EnKF 결과에서는

밴드폭이 오히려 증가하고 예측이 제대로 수행되지 않는다. DCT에서는 가스에서의 결과와 같이 불확실성이 감소하지만 생산추이를 맞추지 못한다. 4번 유정에서는 실제거동을 밴드 내에 포함하지 못한다. PFR에서는 불확실성을 상당히 감소시키지만 과소평가 문제가 발생한다. DCT와 PFR 결합기법은 현저한 성능 향상을 보인다. 4번과 12번 유정에서 모두 밴드폭이 감소하고 앙상블 평균이 실제거동에 상당히 근접한다.

하지만 제안방법은 이보다 더 개선된 성능을 제시한다. 4번 유정에서 물생산 시작시점을 더 정확히 맞추며 12번 유정에서는 보다 더 감소된 불확실성으로 기법의 신뢰성을 증명한다. 케이스 1, 2번에서와 달리 케이스 3의 마지막 두 기법은 성능의 차이를 뚜렷하게 보임으로써 초기 앙상블디자인 기법의 효과를 확인할 수 있다.



(a) Gas well rate



(b) Water well rate

Figure 3.20 Updated results of well gas and water productions in case 3.

Fig. 3.21은 가스 및 물 누적생산량의 예측결과이다. 누적가스생산량은 앞 케이스들처럼 가스거동의 특징 때문에 작은 불확실성을 가지며 교정결과들 또한 불확실성이 감소하여 작은 밴드폭을 보인다. 이 때문에 기법 간 성능을 비교하기 쉽지 않다.

반면 누적물생산량은 기법 간의 특성화 결과가 큰 차이를 나타낸다. Fig. 3.22는 유체투과율 특성화 결과이다. 유체투과율 분포와 누적생산량을 함께 비교 및 해석할 것이다. Fig. 3. 22에서 초기모델은 매우 큰 불확실성으로 앙상블멤버들의 다양성을 반영한다.

누적물생산량에서 EnKF는 오히려 더 커진 불확실성 때문에 안정된 예측이 불가하다. 유체투과율 분포 또한 교정에 의해 정규분포로 수렴하는 EnKF의 전형적인 한계를 보인다. 채널패턴과 연결성을 전혀 파악할 수 없는 분포이다. 특히 유체투과율의 자연로그 ln(md) 값이 -20에서 20까지 존재하는 심한 오버슈팅과 언더슈팅이 발생한다. 잘못된 유체투과율 교정은 누적물생산량 예측의 실패로 이어진다.

DCT에서는 누적물생산량을 잘못된 방향으로 수렴시켜 과대평가한다. 케이스 2에서는 DCT만으로도 채널의 대략적인 패턴을 읽고 누적물생산량 예측에도 성공했지만(Figs. 3.15, 16) 이는 비교적 단순한 특성화 문제에서만 유효했음을 케이스 3의 DCT 결과로 확인할 수 있다. Fig. 3.22에서 DCT는 S자 패턴까지는 맞추지만 패턴 위의 유체투과율 값에 오버슈팅이 발생하고 정확성

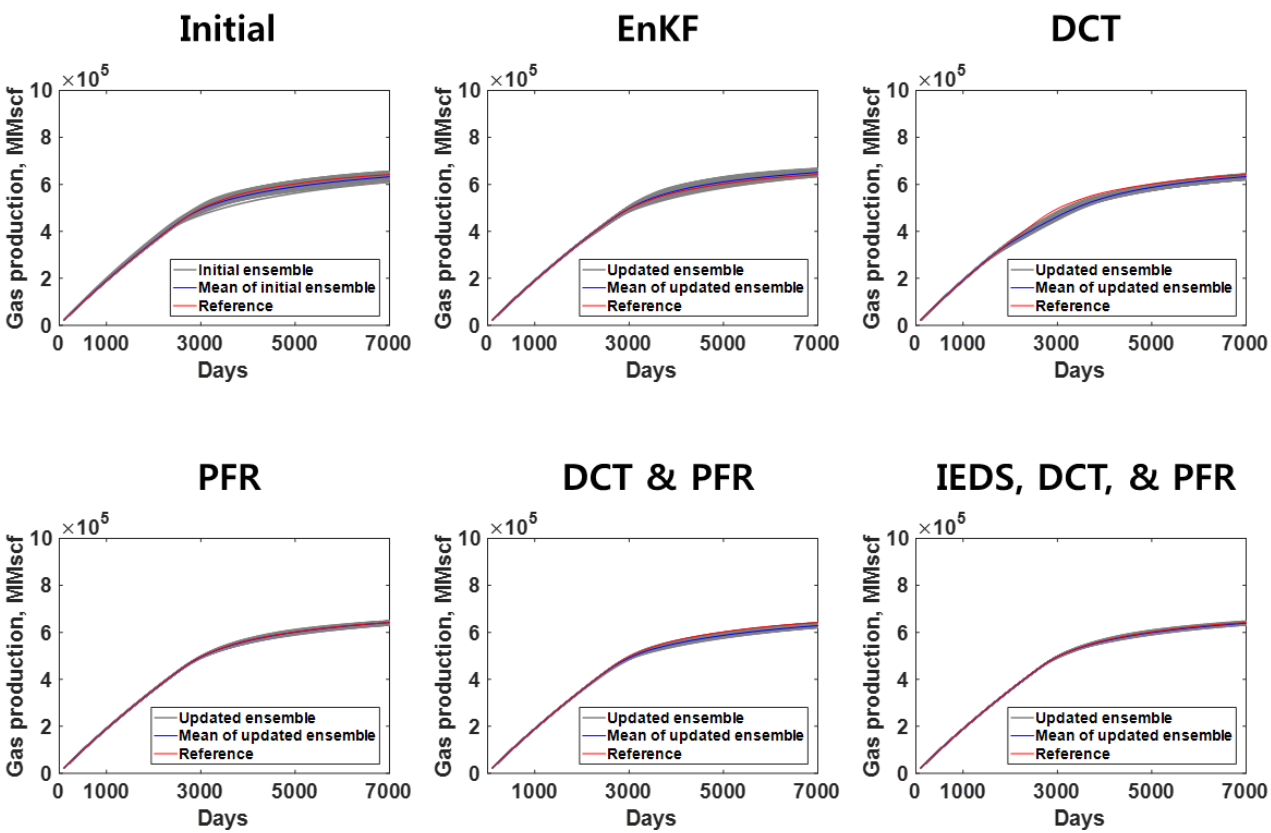
부족 때문에 결국 누적물생산량을 과대평가한다. 이번 케이스에서는 DCT 기법의 한계가 드러난다.

PFR의 누적물생산량 결과는 밴드 안에 참조모델 거동을 포함하긴 하지만 누적생산량을 과소평가한다. 유체투과율 분포는 S자에 가까워지긴 하지만 패턴을 파악하기엔 명확하지 않다. 채널의 연속성과 연결성이 부재하기 때문에 대수층으로부터 물이 유입되지 못하고 이는 누적물생산량 과소평가의 원인이 된다. 1, 2번 케이스의 PFR 결과는 히스토그램 상에서 이봉분포에 가까운 모습을 보여줬지만(Figs. 3.11, 16) 본 케이스에서는 이봉분포를 유지하지 못했다.

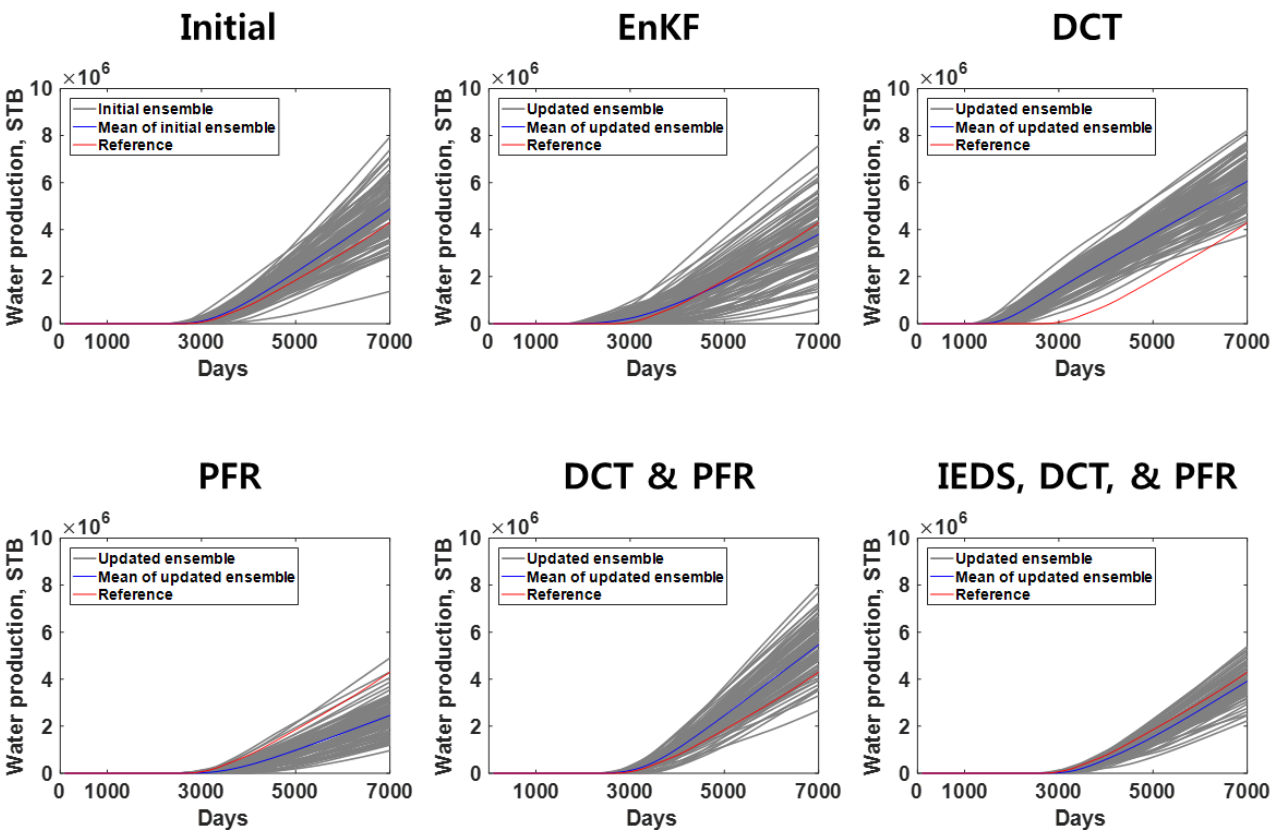
DCT, PFR 결합은 오히려 PFR보다 못한 누적물생산량 예측성능을 보인다. 불확실성이 초기모델과 거의 비슷하며 누적생산량을 과대평가한다. 유체투과율의 채널패턴과 히스토그램의 분포는 참조모델에 근접한다. 하지만 S자 외에 섬처럼 분포하는 부분들, S자 오른쪽 밑의 끊어진 연결, 사암도 셰일도 아닌 유체투과율 값들이 히스토리매칭 성능을 떨어뜨린다.

DCT, PFR 결합이 PFR보다 못한 이유는 채널특성을 유지하려는 것과 히스토리를 매칭하려는 것을 함께 수행하려다가 둘 모두를 만족시키는 것에 실패했기 때문이다. 유체투과율의 대략적인 경향을 맞추었으나 세밀한 부분에서는 그 성능이 떨어져 결국 히스토리매칭의 실패로 이어진다.

제안방법은 물 누적생산량의 불확실성을 뚜렷하게 감소시키고 밴드폭 중앙에 참조필드의 거동을 포함하는 안정된 성능을 보인다. 유체투과율 필드는 참조모델과 매우 유사한 채널패턴을 보인다. S자 왼쪽 밑 부분을 제외한다면 채널의 특성인 연속성, 연결성, 패턴을 모두 보존한다고 평가할 수 있다. 히스토그램 상에서도 참조필드와 같은 이봉분포를 갖는다.



(a) Total gas rate



(b) Total water rate

Figure 3.21 Updated results of total gas and water productions in case 3.

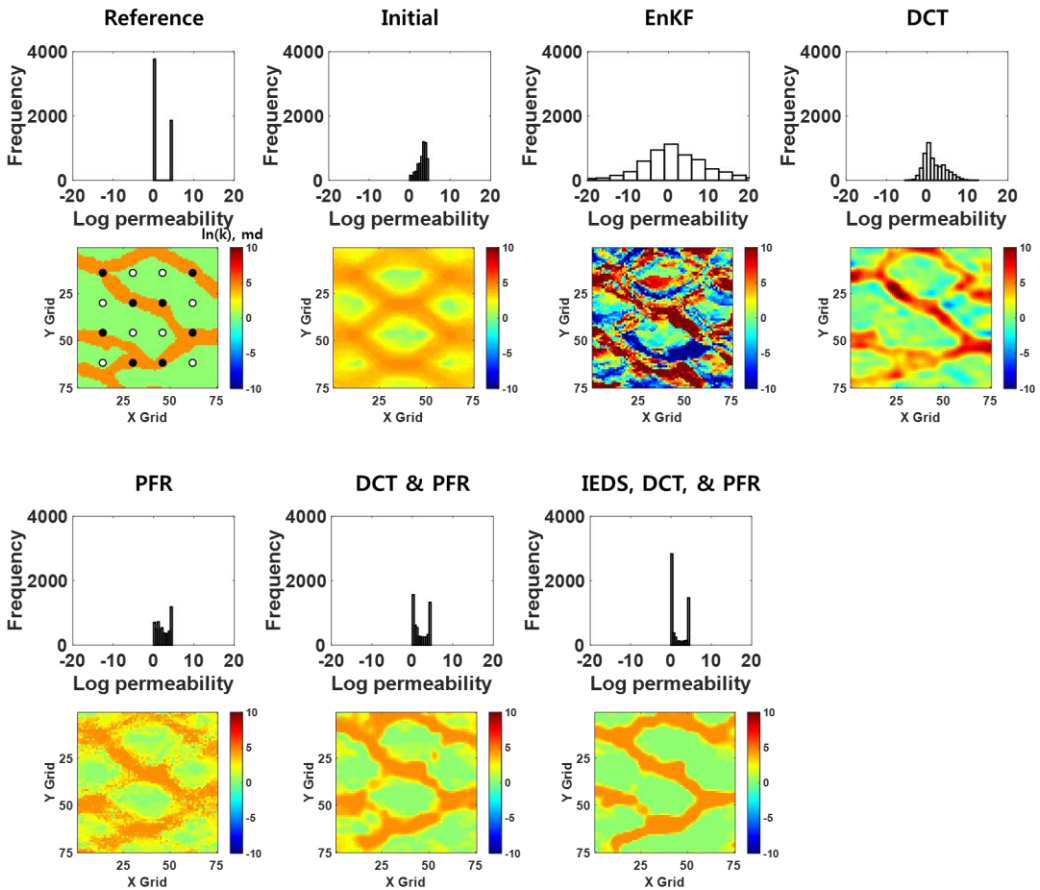


Figure 3.22 Characterization results of permeability distribution in case 3.

Fig. 3.23은 4개 앙상블 모델의 유체투과율 특성화 결과이다. 네 개의 초기모델들은 모두 다양한 채널패턴을 갖는다. EnKF는 채널이라고 보기 힘든 교정결과이며 유체투과율이 극단적으로 크거나 작게 나타난다. DCT에서는 정도의 차이는 있지만 EnKF와 마찬가지로 오버슈팅이 발생한다. 패턴은 보이지만 불안정한 연결성과 부적절한 교정으로 인해 유체투과율 특성화에 실패했다. PFR 결과는 높은 유체투과율 값들이 S자를 따라 자리잡고 있지만 서로 너무 분산돼 있어 채널을 형성하진 못했다.

DCT와 PFR 조합은 셰일과 사암의 구분이 확실하지만 연결이 심하게 끊어져 채널특성 보존은 불안정하다. 그럼에도 불구하고 앞의 기법들에 비해 여전히 패턴 파악은 가능하다. 마지막 두 행은 IEDS로 생성한 초기필드와 그 교정결과이다. 제안기법은 채널과 배경의 구분, 채널 연결성, 패턴에서 모든 기법에 비해 뛰어나다.

첫째 샘플에서 S자 위쪽 부분의 끊어진 부분들을 제안기법에서는 연결한다. 두 번째와 세 번째 모델에서도 마찬가지다. 네 번째 모델에서는 연결성을 개선하고 DCT, PFR 조합결과의 섬 지역을 없애는 세밀함까지 확인할 수 있다. 이 같이 제안방법은 참조필드와는 전혀 다른 초기모델에서 채널의 연속성을 유지하면서도 연결의 끊을 부분과 이을 부분을 구분해주는 채널저류층 특성화에 필수적인 성능을 증명한다.

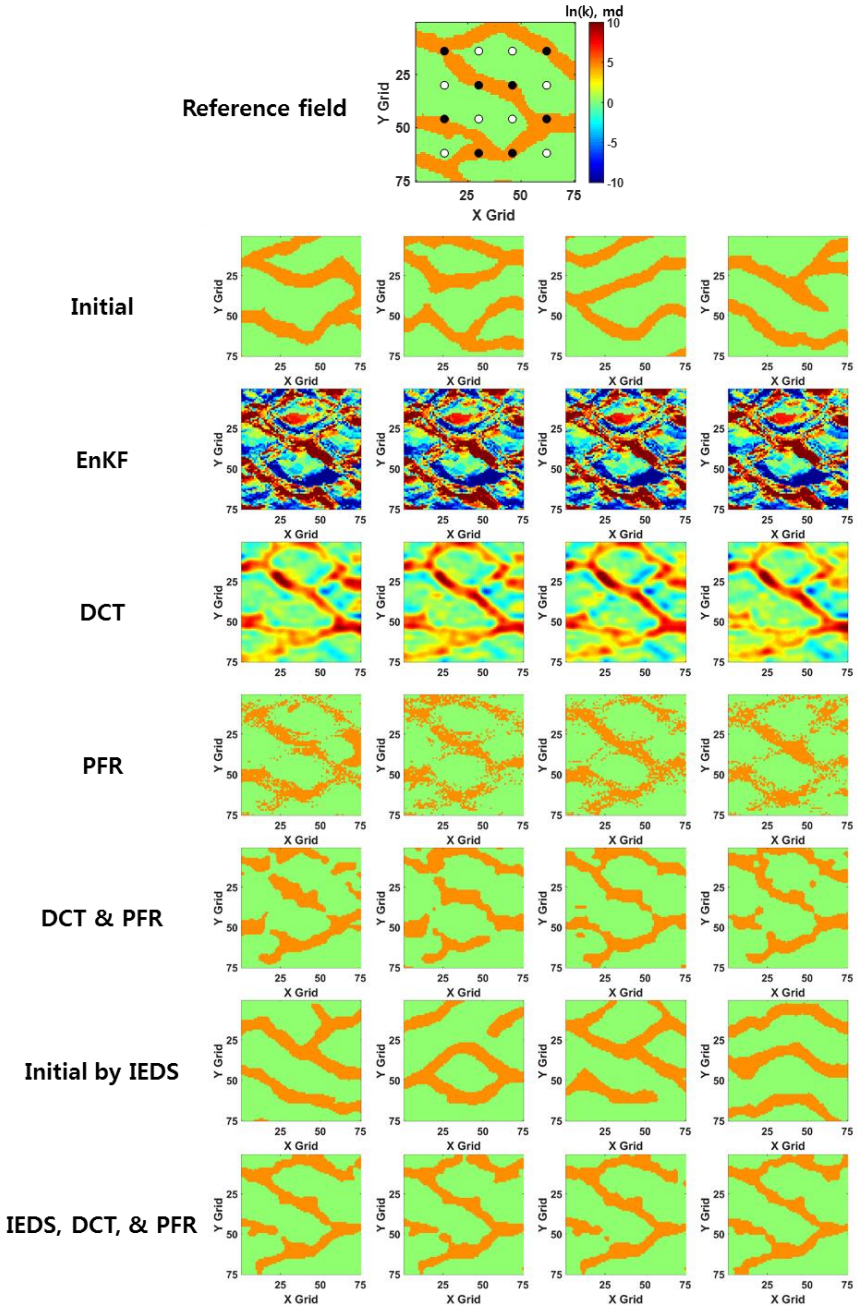


Figure 3.23 Examples of permeability distribution results in case 3.

Fig. 3.24는 대수층 강도의 특성화 결과이다. 초기모델에서 MULTPV 값들은 300에서 360 사이의 값을 갖는다. 이는 전체 저류층 대비 16~19배의 부피이다. 참조모델의 대수층 강도는 제일 윗부분에 표시하였다.

EnKF 결과에서는 남쪽의 언더슈팅, 서쪽의 오버슈팅 때문에 통일된 스케일에서 나타낼 수 없었다. 남쪽의 대수층 강도는 평균 약 230, 서쪽은 약 470의 값으로 평가되었다. 이는 대수층 동반 채널저류층의 높은 불확실성으로 인한 그 특성화의 어려움을 반영한다.

DCT의 경우 약간의 과소 및 과대평가에도 불구하고 그 불확실성을 감소시키고 있다. PFR은 5개의 기법 중 가장 좋은 대수층 강도 평가성능을 보인다. RMSE 값이 가장 작고 불확실성 또한 감소하였다. DCT와 PFR 결합 결과도 북쪽에서의 과대평가를 제외하면 비교적 낮은 RMSE와 불확실성이라 할 수 있다. 제안기법도 마찬가지로 남북 쪽을 제외하면 적절한 평가를 보인다. 남북 쪽에서는 채널연결이 대수층과 멀리 떨어져 있어 대수층 강도의 단서를 얻기 힘들기 때문에 이 같은 특성화 경향을 보인다.

모든 인자에서 다섯 기법을 비교했을 때 Table 3.9와 같이 정리할 수 있다. EnKF는 거의 모든 예측 및 평가들이 매우 불안정했기 때문에 채널저류층에 적용하기 가장 낮은 성능이었고 DCT나 PFR도 역시 EnKF 결과와 크게 다르지 않았다. 누적가스생산량은 원래 인자 자체의 불확실성이 낮았기 때문에

기법 간의 성능차이를 보이지 않았다. 하지만 불확실성이 큰 물생산량 인자, 채널특성을 반영해줘야만 하는 유체투과율 분포에서는 기법 간의 신뢰성 차이를 확실히 구분 지을 수 있었다.

케이스 1, 2와 달리 케이스 3은 스케일이 더 크고 이에 따라 전체적인 불확실성이 커지기 때문에 특성화의 난이도가 높다. 이로 인해 케이스 2의 최고와 최저 성능의 차이보다 케이스 3의 것이 더 컸다. 필드의 복잡성이 증가하면서 제안방법의 신뢰성이 두드러진다. 제안방법을 통해 필드 크기나 인자들의 불확실성에 상관없이 일관성 있게 안정적인 특성화 결과를 얻을 수 있다.

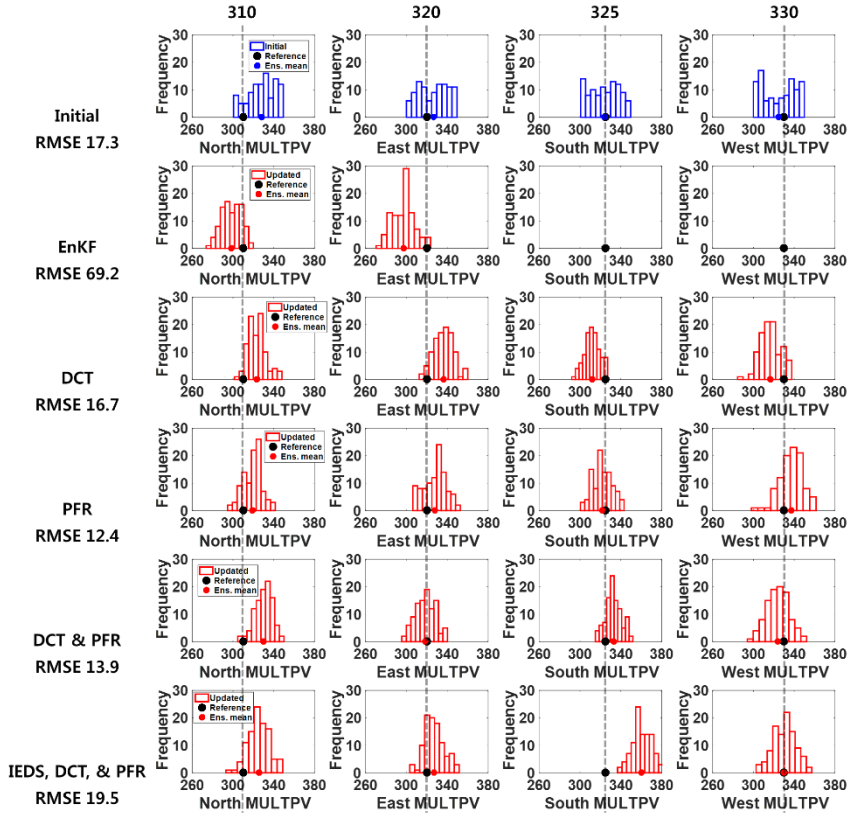


Figure 3.24 Characterization results of aquifer strengths in case 3.

Table 3.9 Comparison of each performance in case 3

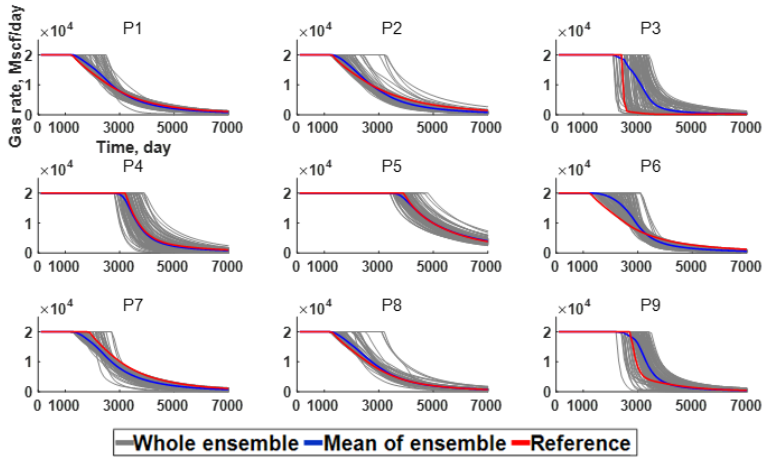
Method	EnKF	DCT	PFR	DCT PFR	IEDS DCT PFR
Well gas rate	Poor	Poor	Fair	Fair	Good
Well water rate	Poor	Poor	Poor	Fair	Good
Total gas rate	Good	Good	Good	Good	Good
Total water rate	Poor	Poor	Poor	Poor	Good
Permeability	Poor	Poor	Poor	Fair	Good
MULTPV	Poor	Fair	Good	Good	Fair

3.3 대수층 동반의 3차원 채널가스저류층

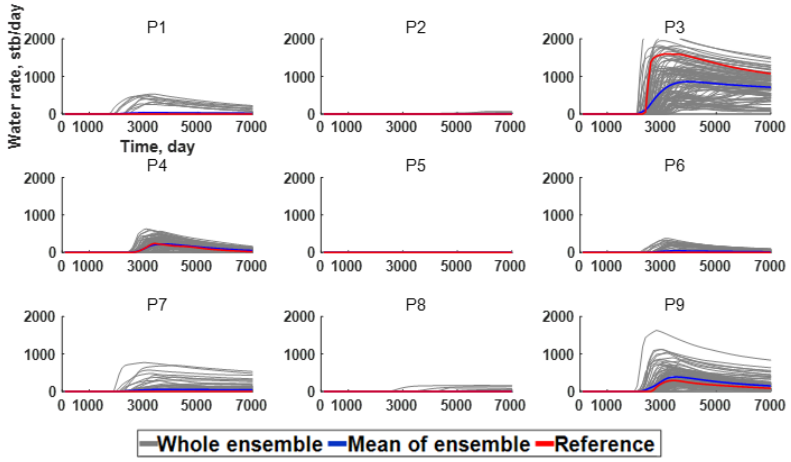
3차원 채널저류층은 층과 층 사이에서 유동이 발생하고 참조필드와 유사한 생산거동을 보이는 다수의 해가 생길 가능성이 커지므로 성공적인 특성화 수행이 어렵다. 케이스 3의 PFR 결과에서 대수층인자는 성공적으로 맞추더라도 유체투과율이나 물 생산량은 전혀 그렇지 않은 것을 보면 알 수 있다.

Fig. 3.25는 초기 앙상블의 가스 및 물 생산량 결과이다. 케이스 2와 같이 39×39 격자 임에도 세 개의 층으로 구성되어 있기 때문에 가스와 물 생산거동의 불확실성이 현저히 증가한다(Fig. 3.13). 케이스 1, 2와 같이 유정 3, 4, 5, 9번에서의 암상은 사암이며 해당 유정들은 채널 위에 존재한다. 그 때문에 시뮬레이션 중반까지도 가스생산을 유지한다.

대부분의 유정에서 초기모델의 평균거동은 참조모델의 거동과 크게 다르지 않다. 하지만 유정 3, 6, 9번은 대부분 가스생산량을 과대평가한다. 생산량의 과대평가는 운영과정에서 잘못된 의사결정을 야기해 경제적 손실을 입을 수 있으므로 특성화된 모델의 결과에서 주의 깊게 봐야 할 점이다. 따라서 대표적으로 세 개의 유정에 대한 예측결과를 제시한다. 나머지 유정에 대해서는 부록 B에 수록한다(Figs. B.6, 7).



(a) Gas well rate



(b)Water well rate

Figure 3.25 Well gas and water productions of the initial ensemble in case 4.

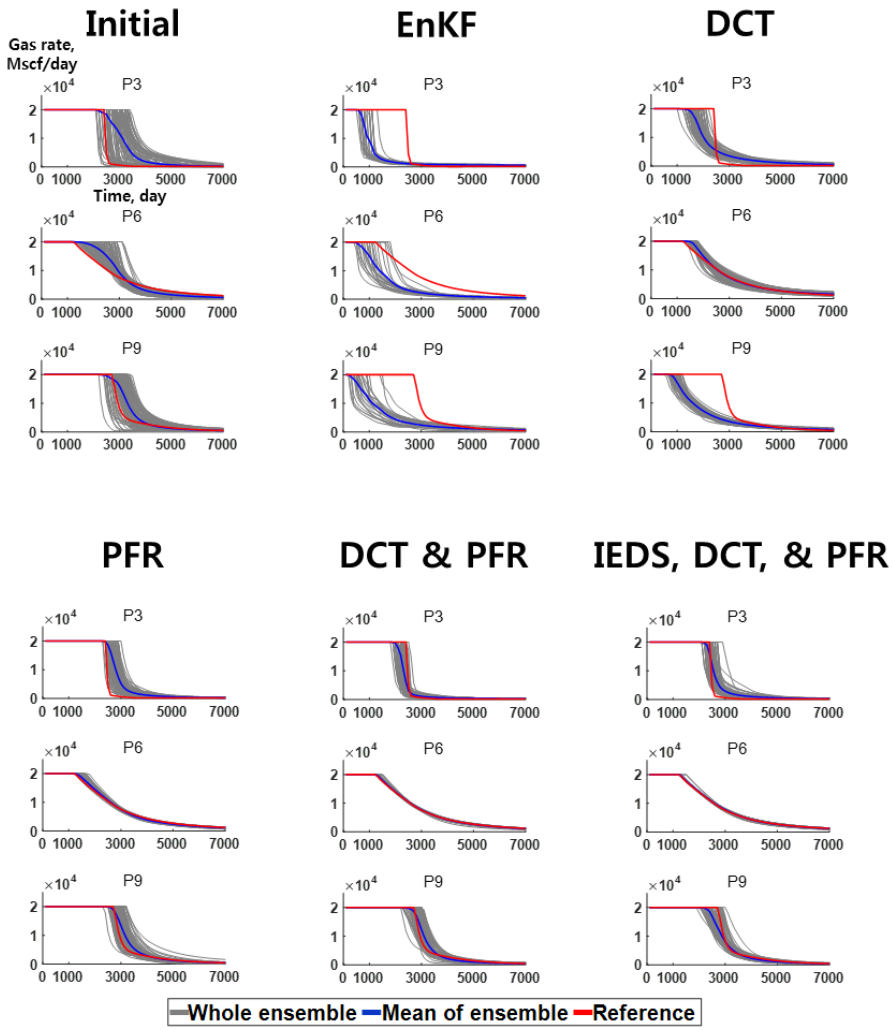
Fig. 3.26은 유정 별 가스 및 물 생산량의 예측결과이다. Fig. 3.26a에서 EnKF의 경우 두 번의 교정에서 벌써 심한 오버슈팅이 일어난다. 이로 인해 비정상적으로 커진 인자들이 일부 앙상블의 시뮬레이션 과정에 오류를 발생시켜 결과를 볼 수 없어 일부 앙상블의 예측결과만을 도시하였다. 세 개의 유정 모두에서 생산량을 과소평가하는 결과를 보였다. 특히 9번 유정에서 가스생산량의 급격한 감소를 볼 수 있는데 이는 Fig. 3.

26b에서 볼 수 있듯이 물생산량의 이른 증가로 인한 것이다. 유정이 대수층에 가까이 위치하고 유체투과율이 높은 값으로 교정된 때문인 것으로 추정된다. 이는 뒤의 특성화된 유체투과율 분포 결과에서 확인한다.

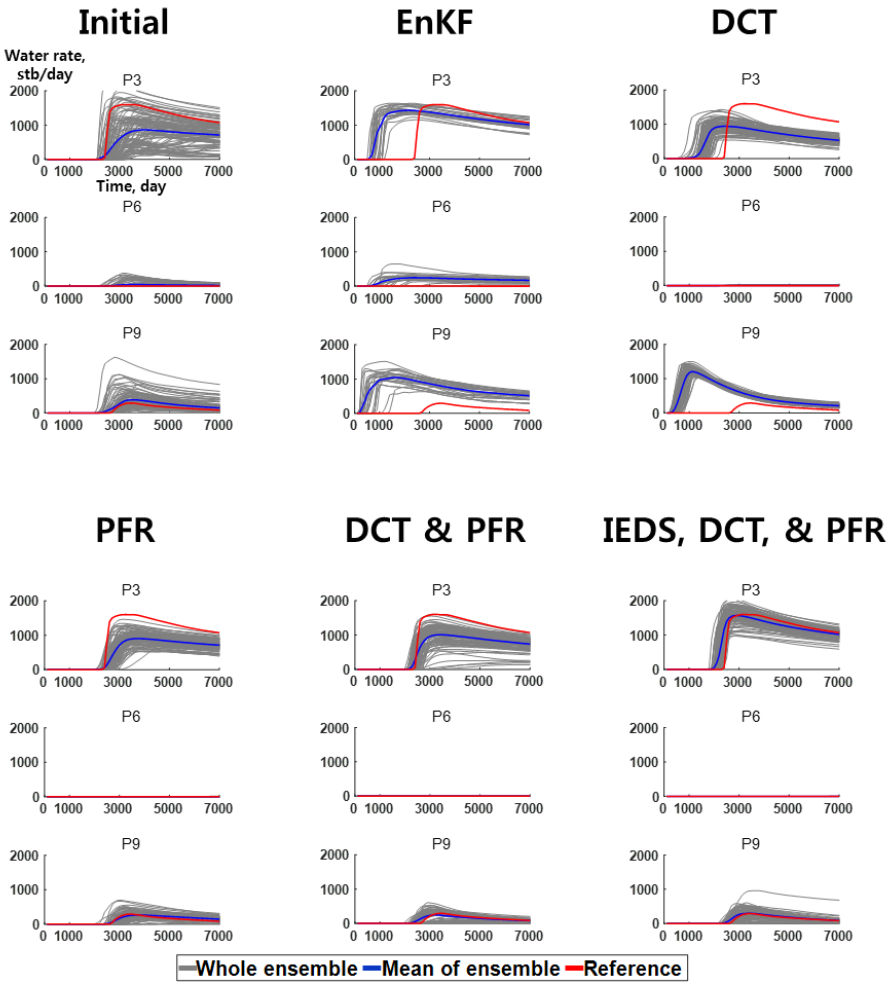
Fig. 3.26b의 초기모델에서 물생산량 거동은 유정 3번에서 가장 큰 불확실성을 갖는다. 유정 9번에서는 평균거동이 실제거동을 따르지만 큰 불확실성을 보인다. EnKF는 유정 3, 6, 9번 모두에서 물생산량을 과대평가한다. DCT 또한 물생산 시작시점을 너무 이르게 예측하고 참조모델과는 전혀 다른 거동을 보인다. DCT는 유체투과율의 대략적인 경향은 찾지만 그 방향을 제대로 잡아주지 않으면 잘못된 방향으로 모델들이 수렴하는 특성을 보인다. 이는 이전 케이스 1과 2에서도 확인할 수 있다.

PFR에서는 9번 유정의 예측성능이 개선되나 3번 유정에서 참조모델을 포함하지 못하는 밴드가 형성된다. DCT와 PFR 결합기법도 비슷한 결과를 보였다. 오히려 3번 유정에서는 더 큰

불확실성을 보여 기법의 신뢰성이 떨어진다. 제안기법은 다른 기법들에 비하여 3번 유정에서 상당히 안정되고 적절한 예측성능을 제시한다. 물생산 시점의 정확성은 물론이고 전체적으로 참조모델 거동에 일치한다.



(a) Gas well rate



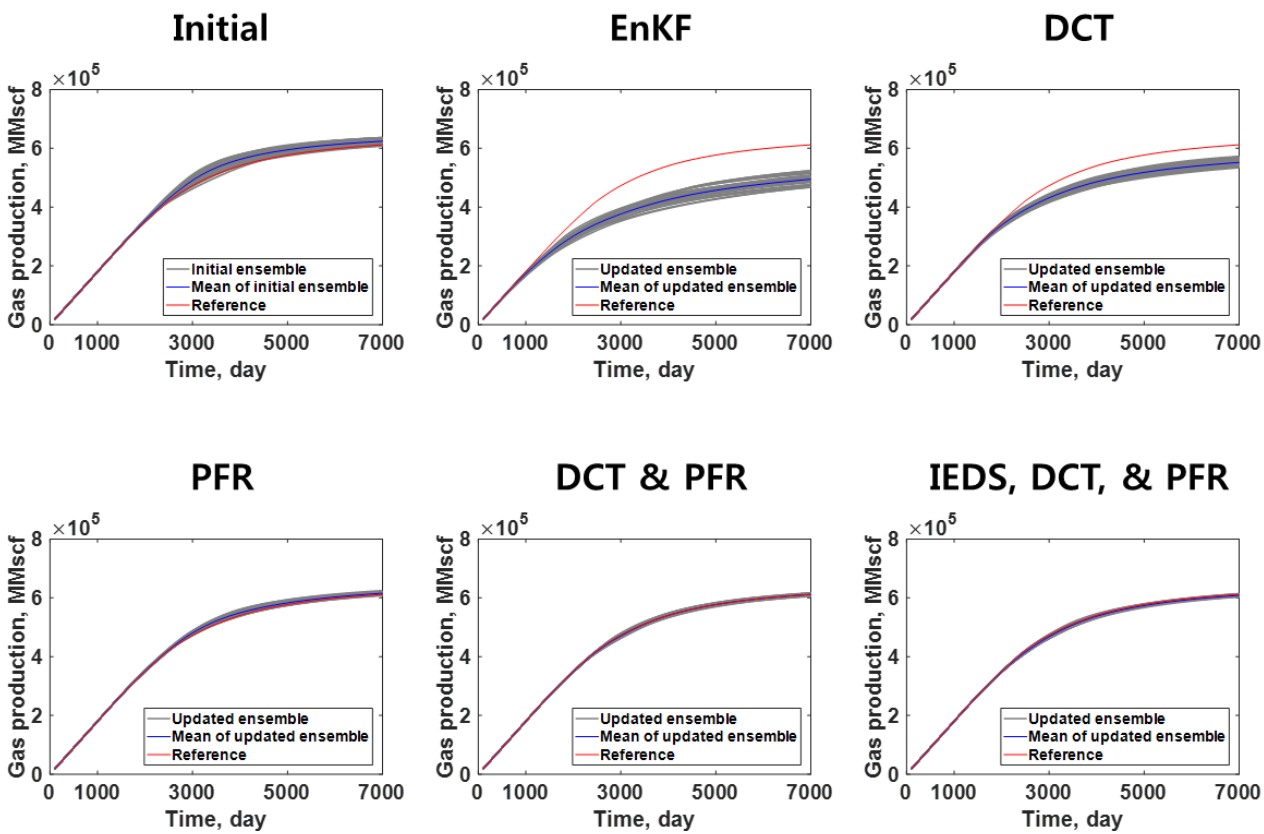
(b) Water well rate

Figure 3.26 Updated results of well gas and water productions in case 4.

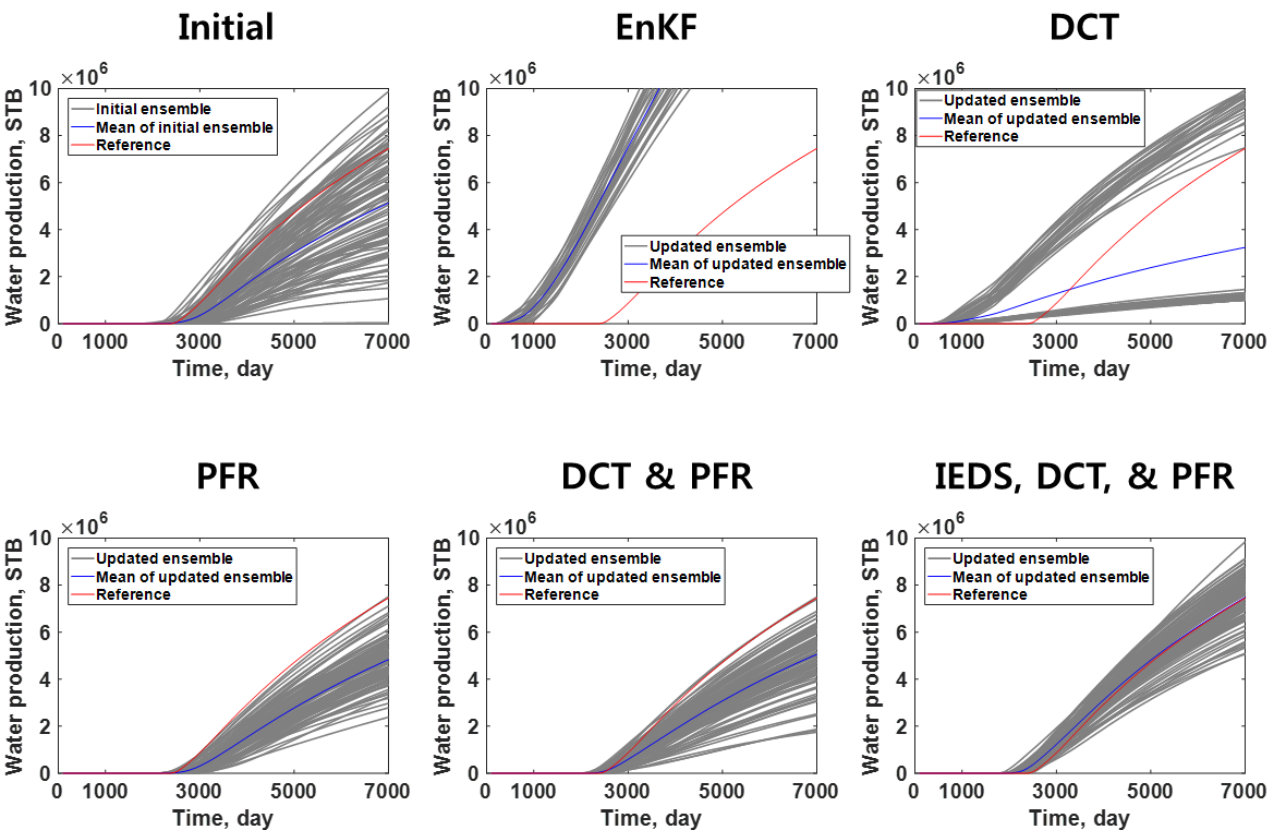
Fig. 3.27a와 b는 각각 가스 및 물 누적생산량 예측결과이다. 누적생산량에서도 EnKF 결과는 시뮬레이션을 수행할 수 있었던 일부 앙상블의 것이다. 저류층에 물이 초기에 유입되고 유정 별 가스생산량이 작다 보니 누적가스생산량 또한 실제거동보다 작게 예상한다. DCT 결과도 마찬가지로 누적가스생산량을 과소평가한다. 나머지 기법들의 누적가스생산량 결과는 불확실성 감소와 참조모델 거동과의 일치를 보인다.

참조모델의 누적물생산량은 2,500일쯤부터 증가하기 시작하여 마지막 시점엔 7백만 STB정도에 다다른다. EnKF 결과는 물생산을 과도하게 예측하여 통일된 스케일에서 보이지 않지만 2천만 STB 가량에 다다른다.

DCT의 교정된 모델들이 누적생산량을 과대평가 또는 과소평가하는 두 갈래로 거동이 나뉜다. 이는 DCT가 전반적인 패턴을 잡아주지만 세밀한 부분에서 유체투과율 값이 크게 갈리기 때문이다. 세밀한 차이더라도 유정이 높은 유체투과율 부근에 존재하느냐 낮은 곳에 존재하느냐에 따라 매우 다른 거동을 보일 것이므로 이 같은 현상이 발생한다. 평균 앙상블의 거동이 밑으로 기운 것을 보아 과소평가하는 쪽의 앙상블이 더 많은 것을 알 수 있다. 기존 케이스 1~3에서는 DCT로 채널의 전반적인 패턴을 유지했으나 케이스 4번의 높은 불확실성으로 인해 DCT적용에도 불구하고 패턴을 파악할 수 없었다. 이는 DCT의 특징과 한계를 모두 보여주는 것이다.



(a) Total gas rate



(b) Total water rate

Figure 3.27 Updated results of total gas and water productions in case 4.

Fig. 3.28은 각 기법을 이용하여 특성화한 100개 모델들의 7,000일 째 물 누적생산량 예측결과를 박스플롯(box plot)으로 나타낸 것이다. 박스플롯에서 직사각형의 경계는 아래와 위 사분위수를 나타내고 아웃라이어(outlier)가 없다면 검은 점선 끝의 직사각형과 평행으로 짧게 그려진 선은 최대와 최솟값을 의미한다. 위, 아래 사분위수의 차이는 분위수구간(inter-quartile range, IQR)이라 하는데 위, 아래 사분위수로부터 1.5배 이상 크거나 작으면 빨간 십자가 모양으로 아웃라이어를 나타낸다. IQR 안의 빨간 선은 중앙값이다. 모든 박스플롯에 걸쳐 그려져 있는 빨간 점선은 참조모델의 7,000일에서의 누적생산량이다.

초기모델의 물 누적생산량은 거의 0부터 천만 STB에 걸쳐 넓은 폭으로 퍼져 있다. 백만단위로 3.5에서 7에 IQR이 형성된다. DCT 결과는 IQR이 1에서 8정도로 그 구간이 더 크다. Fig. 3.27b에서는 시각적으로 불확실성이 다소 줄어든 것으로 보였지만 실제로는 밴드폭 안에서 불확실성이 오히려 커진 것을 확인할 수 있다(Fig. 3.28의 두 번째 박스플롯).

PFR은 최대와 최소의 폭이 확연히 줄어들었지만 참조모델의 값과는 멀어진 곳으로 수렴한다. 초기모델과 마찬가지로 물 누적생산량을 과소평가하여 물처리에 대한 대책을 미리 세우는 등의 의사결정에 도움을 주지 못한다. DCT와 PFR 결합기법도 마찬가지로 물생산량을 과소평가하고 그 불확실성 또한 안정적으로 감소시키지 못한다. PFR 결과에 비해 IQR과 최대 및 최솟값의

차이가 오히려 커졌다.

제안기법은 초기모델에 비해 성공적으로 불확실성을 줄이고 IQR에 참조모델 값이 들어오는 결과를 준다. IQR이 다른 기법의 결과들보다 작다는 것은 그만큼 많은 모델들을 그 안으로 포함하여 일관된 경향으로 참값을 예측함을 의미한다. IQR의 위치는 최대, 최소 사이에서 한쪽으로 치우치지 않고 가운데 위치하여 안정된 경향을 갖는다. 무엇보다도 모든 기법 중 참값에 중앙값이 가장 가깝게 위치하여 기법의 신뢰성을 보여준다.

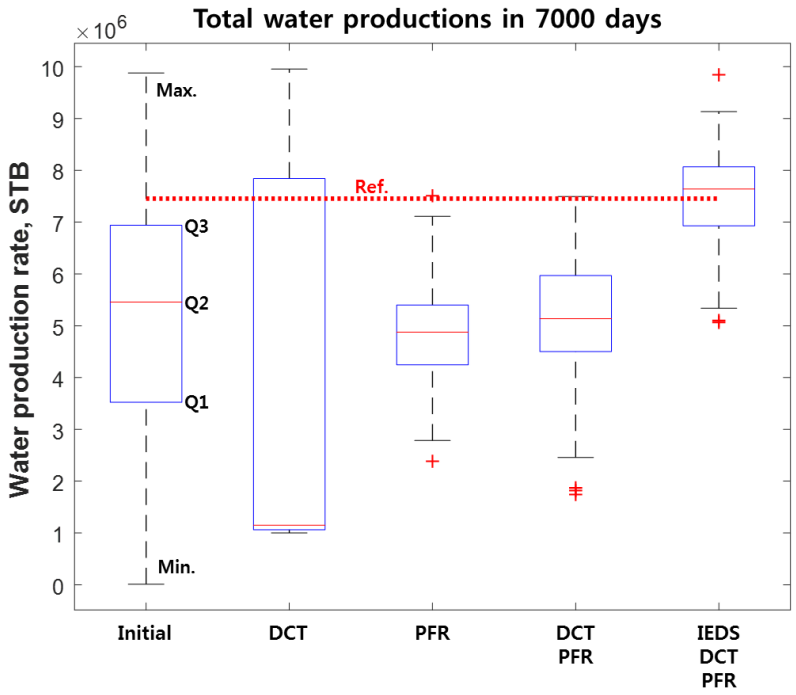


Figure 3.28 Updated results of total water productions by box plot in case 4.

Fig. 3.29은 각 기법을 적용하여 특성화된 모델들의 평균 유체투과율 분포이다. L1에서 L3은 저류층의 위에서 아래로 1번부터 3번 층을 의미한다. 참조모델에서는 두 개의 주요 채널이 대각 방향으로 지나고 있고 4개의 검은색으로 표시된 유정의 암상은 사암이다. 세 개의 층에는 같은 암상분포가 적용되며 따라서 채널들도 층마다 서로 비슷한 경향을 보인다.

초기 앙상블은 네 개의 사암인 지점을 정적자료로 이용하여 생성했기 때문에 그 위로 채널이 지난다. Fig. 3.29의 EnKF 결과에서는 심각한 오버슈팅과 언더슈팅이 발생하였다. 히스토그램에서는 EnKF 교정으로 인해 정규분포와 같은 형태를 보이며 -10에서 10까지 값을 형성한다. 너무 큰 유체투과율의 영향을 받아 대수층과 가까운 유정들은 물의 침입이 초기에 일어났고 이에 따라 물생산량은 과대하게, 가스생산량은 과소하게 평가된다(Figs. 3.26, 27). EnKF의 한계로 인해 유체투과율 평가가 제대로 이뤄지지 못했고 이는 히스토리매칭의 실패로 이어졌다.

케이스 1~3에서 DCT는 히스토리매칭에서 좋은 결과를 보이진 못하더라도 참조필드의 유체투과율 분포의 전반적 경향은 파악할 수 있었다. 하지만 본 케이스 4에서 DCT로는 이전 케이스와 달리 대략적인 채널패턴 조차도 파악할 수 없다. 채널의 흐름이 어디서 어디로 가는지 가늠하기 어렵고 각 층 별로 일관성 또한 부족하다. 첫 번째 층의 좌측 상단은 셰일로 이뤄져야 함에도 불구하고 유체투과율을 과대평가한다. 히스토그램에서도 볼 수 있듯이

EnKF와 마찬가지로 오버슈팅과 언더슈팅이 발생하였다.

PFR의 경우 채널패턴과 연결성이 부재하고 격자별로 분리된 상태를 보인다. 두 개의 주요 채널과 상관없이 그렇지 않아야 될 대부분의 곳들에서 셰일의 1 md보다 높은 유체투과율을 형성한다. 이는 앙상블 중 많은 수의 모델에서 채널이 아닌 곳이 사암으로 평가되었기 때문이다. 케이스 1과 2에서만 해도 PFR 적용 결과에서는 이봉분포에 가까운 분포를 보였었다. 하지만 본 케이스에서는 이봉분포보다는 오히려 균일분포에 가까울 정도로 경향이 전무한 결과를 주었다. 이는 결국 케이스 4에서 차원의 증가에 따른 불확실성 증가 때문이다.

DCT와 PFR 결합은 참조필드의 두 채널을 유사하게 따르게 하고 앞의 기법들에 비해 히스토그램도 이봉분포에 가깝게 형성한다. 하지만 제안기법에 비하면 주요 채널이 아닌 부분에 높은 유체투과율을 보이며 채널과 배경의 구분 정도가 떨어진다. 제안기법은 개선된 이봉분포를 보이고 참조필드 채널경향에 더 가까워진 특성화 결과를 제시한다. 사암과 셰일 간의 경계가 명확해지고 또한 다른 기법들보다 가장 이봉분포에 가까운 히스토그램을 보인다.

Fig. 3.30은 특성화된 앙상블 중 네 개 모델의 유체투과율을 첫 번째 층에 대해서 제시한 것이다. 둘째, 셋째 층에 대한 결과는 부록 B에 제시한다(Fig. B.9). 첫 번째 초기모델은 채널이 네 갈래로 나눠져 있고 그 외의 초기모델들도 각기 다른 경향을 갖고 있다.

모델의 일부분들은 참조필드와 비슷하기도 하고 다른 채널을 보이기도 한다. IEDS로 생성된 초기모델들은 더 단순해진 경향들을 갖는다.

EnKF의 결과에서는 오버슈팅이 발생하여 네 개 모델의 비슷한 지점에서 너무 크거나 작은 유체투과율을 보인다. 특히 3번과 9번 유정에서 유체투과율을 과도하게 크게 평가했음을 다시 한 번 확인할 수 있다. DCT는 채널패턴을 인식할 수 없으며 스케일을 함께 참고한다면 오버슈팅과 언더슈팅이 일어났음을 알 수 있다. DCT 역시 유정 3번과 9번 쪽의 유체투과율을 과대평가하여 물의 유입을 참조필드의 거동보다 이른 시점으로 예측한다. PFR에서는 채널의 연결성이 끊기거나 그 연속성이 부족하여 채널특성의 안정된 보존이 이뤄지지 못한다. 왼쪽 밑에 사암으로 평가한 부분들도 신뢰성을 보장하지 못하게 한다.

DCT와 PFR 결합기법에서는 채널연결성이 보장되지 못하는 모델들이 있다. 앙상블 평균의 유체투과율 결과에서는 보지 못했지만 개별 모델들 중 첫 번째와 두 번째에서는 주요 채널 중 큰 것의 연결이 끊겨 있다. 제안기법은 DCT와 PFR의 결합기법보다는 전체 경향을 더 잘 지켜낸다. 첫째 것과 넷째 것에서 주요 채널경향이 한 번씩 끊기지만 전반적인 성능이 향상되었다.

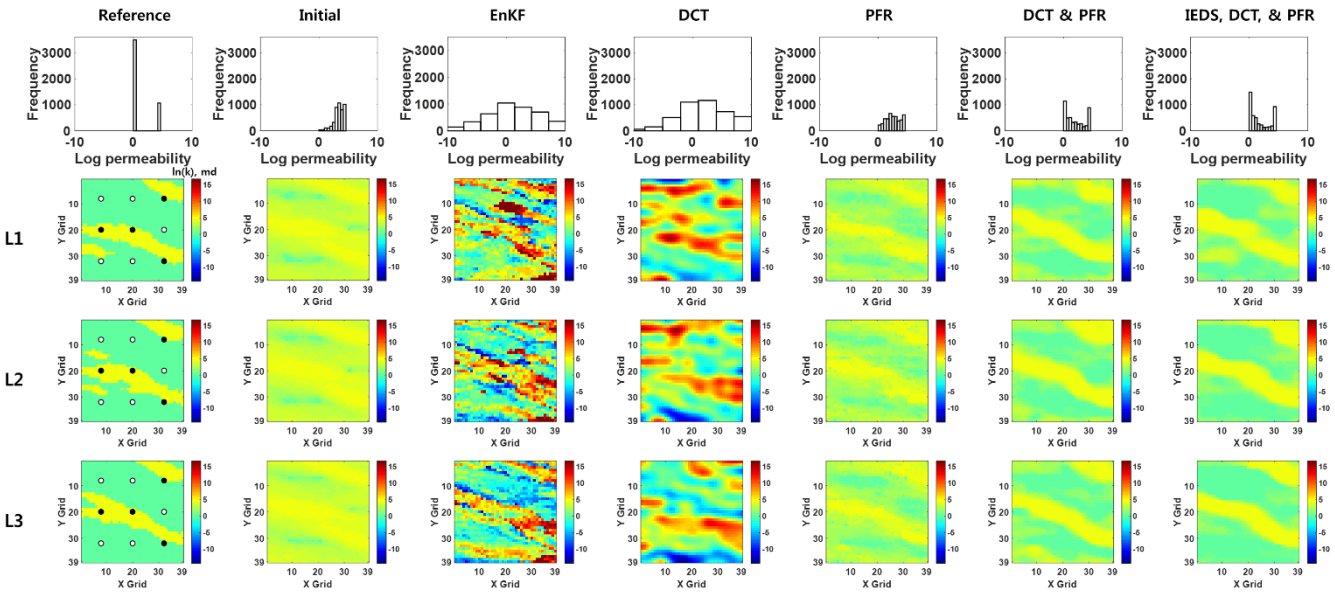


Figure 3.29 Characterization results of permeability distribution in case 4.

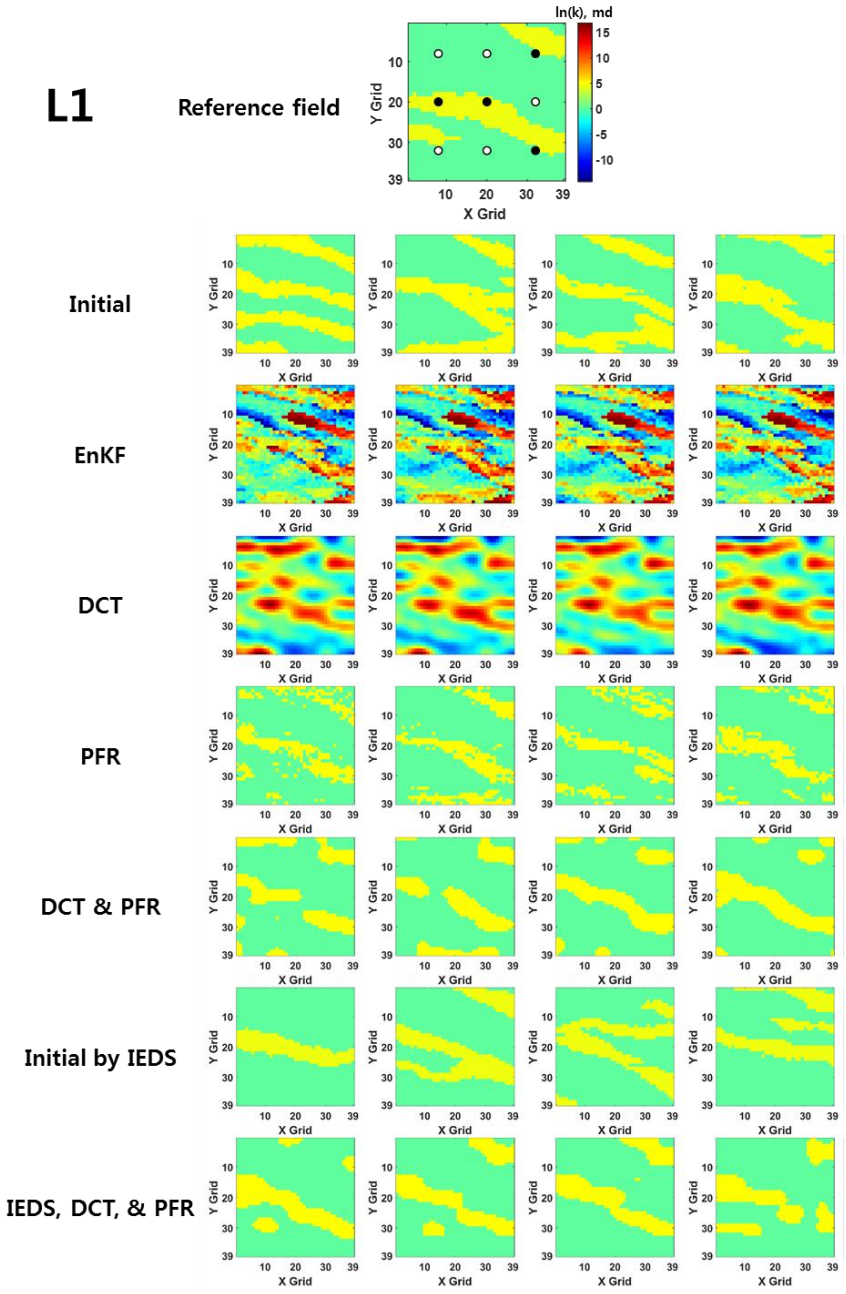


Figure 3.30 Examples of permeability distribution results in layer 1 of case 4.

Fig. 3.31은 대수층 강도의 평가결과이다. EnKF는 유체투과율의 특성화가 기초적으로 잘 이뤄지지 못했기 때문에 대수층인자 또한 신뢰성 있게 평가하기 힘들다. 네 면에서 모두 과대 또는 과소평가를 보인다. RMSE 또한 초기모델보다 오히려 훨씬 커졌다. 특히 북쪽 대수층 강도는 과소평가, 동서쪽 대수층의 강도는 과대평가 한 것을 볼 수 있다. 북쪽 대수층의 물유입은 작은 값으로 특성화된 유체투과율 격자들로 막히고 가로방향으로 나 있는 채널의 특성 때문에 큰 영향을 미치지 못한다. 따라서 대수층 강도를 크게 평가할 수 있는 단서가 없으므로 오히려 강도를 작게 평가한 것이다. 다른 기법들의 결과도 모두 북쪽의 강도를 과소평가한다. 채널의 방향이나 유체투과율을 얼마나 신뢰성 있게 특성화하느냐에 따라서 대수층 강도 평가의 정확도가 갈린다.

대수층인자 평가의 과소 및 과대 평가의 원인은 초기모델과 참조모델의 거동 차이를 통해서도 알 수 있다. 초기모델의 물생산량 거동을 보면 유정 3번에서 참값에 비해 상당히 물생산량을 과소평가한다. 이 경우 EnKF의 알고리즘 안에서 참값과 초기모델의 오차를 매우 크게 인지하고 이를 교정하려 한다. 결과적으로 수정할 수 있는 교정인자들은 유체투과율이나 대수층인자이므로 이들을 증가시켜 물생산량을 늘리게 된다. 이 과정에서 유체투과율의 채널특성이 지켜지지 않거나 언더슈팅이 발생하면 물생산량을 맞추기 위해 대수층인자에서는 오버슈팅이 일어날 가능성이 커진다. 결국은 잘못된 정적인자들의 교정으로 히스토리매칭까지 틀린

방향으로 수행된다.

DCT 결과 또한 EnKF의 것과 크게 다르지 않다. RMSE 값이 다소 감소했지만 여전히 초기모델 보다는 오히려 그 값이 크다. 초기모델의 물생산량을 보면 결국 유정 3번과 9번에서 그 차이가 있고 이를 교정하도록 EnKF 알고리즘이 구동된다. 동쪽의 대수층 강도를 약간 과대평가하고 있고 유체투과율 또한 동쪽에 크게 교정되어 있기 때문에 3번과 9번 유정의 물생산량을 만족시킨다. 따라서 남쪽의 대수층 강도를 굳이 크게 평가해야 될 요인이 사라지고 이는 과소평가로 이어질 수 있다.

PFR 결과에서는 유체투과율 분포에서 채널특성을 모두 보존하지 못하지만 암상비율은 참조필드의 값으로 교정되고 전반적인 경향이 맞춰지므로 대수층인자들 또한 상대적으로 신뢰성 있게 평가한다. DCT와 PFR 결합기법도 상대적으로 RMSE 값이 낮은 편이며 서쪽의 과대평가를 제외한다면 참조필드의 전반적 경향을 잘 따른다.

제안기법은 모든 기법들 중 가장 낮은 RMSE를 보이며 회색의 참조모델 선을 따라 비교했을 때도 가장 좋은 성능을 제시한다. 안정적인 채널특성의 보존, 유체투과율 값들의 신뢰성 있는 교정으로 비교적 정확한 대수층 강도 평가를 이끌어 낸다. 이는 결국 적절한 히스토리매칭 수행 능력으로 연결된다.

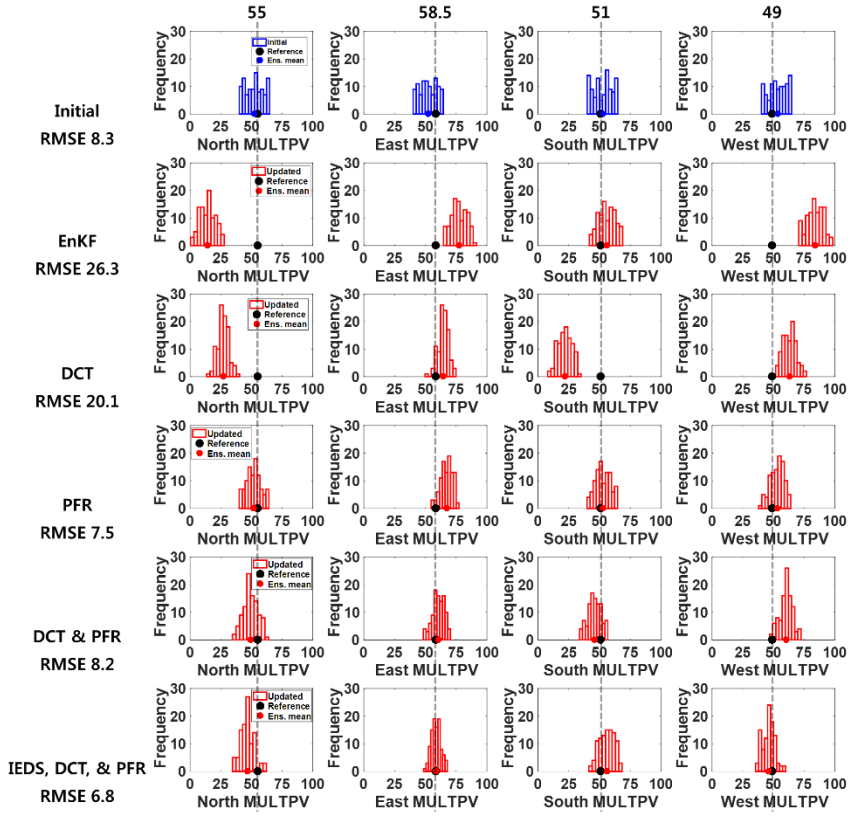


Figure 3.31 Characterization results of aquifer strengths in case 4.

Table 3.10은 각 인자와 각 기법에 대한 정성적 평가이다. 역시 제안기법은 다른 기법과 큰 차이로 가장 안정된 성능을 보인다. 케이스 4가 다른 케이스들과 다른 점은 기법 간의 더욱 커진 성능차이다. 케이스 1에서 4로 갈수록 그 차이가 커진다.

케이스 2와 3은 스케일의 차이, 케이스 3과 4는 차원의 차이로 인해 기법 간 성능차이가 더 커졌다. 다양한 케이스들에 기법들을 적용하고 그 결과를 분석함으로써 기법 간의 차이를 더 극명하게 볼 수 있고 우연에 의한 잘못된 성능비교를 배제할 수 있다.

Table 3.10에서 EnKF나 DCT 기법에 의한 결과는 모든 항목에서 나쁜 평가를, DCT와 PFR 결합기법과 PFR은 양호한 평가를 받을 수 있었다.

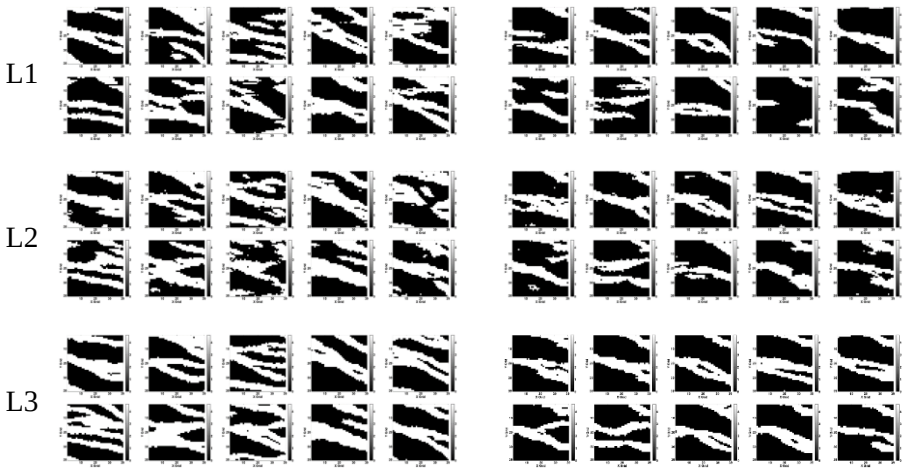
Table 3.10 Comparison of each performance in case 4

Method	**EnKF**	**DCT**	**PFR**	**DCT PFR**	**IEDS DCT PFR**
Well gas rate	Poor	Poor	Fair	Good	Good
Well water rate	Poor	Poor	Poor	Poor	Good
Total gas rate	Poor	Poor	Fair	Good	Good
Total water rate	Poor	Poor	Poor	Poor	Good
Permeability	Poor	Poor	Poor	Fair	Good
MULTPV	Poor	Poor	Good	Fair	Good

다른 케이스들과 달리 케이스 4에서는 눈여겨볼 점이 하나 있다. DCT와 PFR 결합기법과 제안기법 간 성능차이의 변화이다. 케이스 1에서 4로 갈수록 교정할 인자 및 차원의 증가로 인해 불확실성이 커지고 초기 앙상블도 특성화 결과에 더 중대한 영향을 미치게 된다. 이 때문에 IEDS의 성능이 더 부각되는 것이다.

Fig. 3.32는 IEDS의 효과를 보기 위해 케이스 4에서 임의로 뽑은 10개 앙상블 모델의 IEDS 적용 전과 후를 나타낸 것이다. 모든 모델이 SNESim으로 생성된 직후기 때문에 사암 또는 셰일의 이봉분포를 가지므로 분석에 용이하게 흰색은 사암 채널을, 검은색은 셰일 배경으로 나타내었다. Fig. 3.32a는 IEDS를 거치지 않고 트레이닝이미지와 정적자료만을 이용하여 생성한 모델들이다. 반면 Fig. 3.32b는 IEDS를 적용하여 생성한 앙상블이다.

IEDS를 적용하지 않은 모델들은 채널의 양상이 다양하고 여러 갈래로 길이 뻗쳐 있다. 채널이 가로방향으로 20~30도 가량 기울어 있다는 것 외에는 일관성이 없고 불확실성이 크다. 반면 IEDS가 적용되면 채널의 갈래가 적어지고 몇 개의 채널로만 더 일관된 경향을 보이게 된다. 주로 한 두 개의 주요 채널이 가운데로 형성되지만 그 외에도 다른 경로의 채널을 가지면서 다양성을 보존한다. 이 같이 다양성을 유지하면서 참조모델의 거동을 반영할 수 있는 초기모델로 특성화를 수행한다면 오버슈팅과 언더슈팅을 방지하면서도 성공적인 히스토리매칭 결과를 얻을 수 있다.



(a) 10 examples of initial ensemble

(b) 10 examples of initial ensemble with IEDS

Figure 3.32 Examples for IEDS application in case 4.

4. 결론

본 연구에서는 초기 앙상블디자인 기법(initial ensemble design scheme, IEDS), 이산코사인변환법(discrete cosine transform, DCT), 암상비율보존법(preservation of facies ratio, PFR)을 저류층 특성화의 최적화 기법인 EnKF에 결합하여 새로운 방법을 제시하였다. 제시기법을 대수층의 유무, 저류층 규모의 차이, 2차원과 3차원의 네 케이스에 적용한 결과 다음의 결론들을 도출하였다.

1. EnKF는 물리적 특성을 고려하지 못한 인자의 수치적 갱신으로 교정값을 너무 크거나 작게 평가하고 이산적인 격자시스템에서 채널 패턴과 연결성 같은 특성의 보존하지 못한다. 특히 대수층 동반 채널저류층은 큰 불확실성 때문에 EnKF 적용 시 안정된 히스토리매칭 결과를 얻기 힘들다.

2. 본 연구에서는 대수층 동반 채널가스저류층에 알맞은 특성화를 위해 IEDS, DCT, PFR을 EnKF의 알고리즘과 결합하였다. IEDS는 참조모델의 물 생산거동을 잘 예측하는 초기모델들을 선별하고 그 평균필드의 상·하위 5% 유체투과율 중에서 격자를 추출하여 추가 정적자료로 사용한다. 이 과정을 통해 저류층의 제한된 지질정보로부터 신뢰할 수 있는 초기 앙상블을 제공하므로 결과적으로 안정된

특성화 결과를 얻는데 중요한 역할을 한다.

3. DCT는 핵심경향을 추출하여 전반적인 채널패턴을 파악하게 한다. PFR은 할당 비율에 따라 암상을 지정하므로 채널의 이어질 부분과 끊어질 부분을 명확히 한다. 이를 통해 채널과 배경의 경계를 구분하고 효과적으로 채널연결성을 확보할 수 있다.

4. 제안방법을 다양한 케이스에 적용하였다. 케이스 1은 대수층이 없는 2차원, 케이스 2는 대수층 동반 2차원, 케이스 3은 보다 큰 규모의 대수층 동반 2차원, 케이스 4는 대수층 동반 3차원 저류층이다. 케이스 1에서 4로 갈수록 제안기법은 DCT와 PFR을 적용한 EnKF 보다 뛰어난 결과를 주었다. 또한 제안방법은 대수층 유무에 상관없이, 2차원인지 3차원인지에 상관없이 기존 기법들에 비해 안정된 성능을 보였다.

5. DCT와 PFR 결합기법과 제안기법을 비교하여 IEDS의 효과를 확인하였다. 케이스 1에서 4로 갈수록 초기모델의 불확실성과 교정해야 하는 저류층인자가 증가하기 때문에 초기 앙상블의 신뢰성이 특성화 성능에 미치는 영향이 커진다. 따라서 IEDS로 인한 특성화 개선효과가 더욱 부각되어 나타났다.

6. 제안방법은 불확실성이 높고 교정인자가 많은 불균질한 채널저류층에서도 채널특성과 이봉분포를 유지하고 오버슈팅과 언더슈팅 문제를 해결한다. 뿐만 아니라 대수층인자를 적절히 평가하여 성공적인 히스토리매칭 결과를 제시한다.

7. 광구운영 시 의사결정을 위해선 적절한 저류층 특성화와 미래 생산거동 예측이 필요하다. 생산량을 과대 또는 과소 평가하거나 채널에 대한 잘못된 정보를 바탕으로 의사결정을 한다면 경제적 손실을 초래한다. 제안방법은 불확실성 평가가 적절히 이뤄진 미래 생산거동을 제시하므로 저류층 운영에 필요한 합리적 의사결정도구로 이용될 수 있을 것이다.

본 연구로부터 더 발전할 향후 연구는 신뢰성 있는 초기 앙상블을 디자인하는 방법에 대한 것이다. 제안된 초기 앙상블디자인 기법은 그 신뢰성이 증명됐지만 더 효율적인 기법이 제시된다면 특성화에 소모되는 시간과 비용을 아끼고 제안방법의 적용범위를 넓힐 수 있을 것이다. 이에 관련해 제안할 수 있는 연구들은 다음과 같다.

가) 본 연구의 제안방법은 네 종류의 저류층에 적용되었다. IEDS는 초기모델들의 거동을 알아야 적용 가능하므로 만약 더 큰 규모의 저류층 모델이 타겟이라면 소요되는

시뮬레이션 시간이 클 것이다. 참조모델과 유사한 거동을 보이는 모델 선별 시 전체 모델을 거리기반으로 군집화하고 군집의 대표모델만을 기준으로 한다면 군집 수만큼의 시뮬레이션만 수행하면 된다(Kang *et al.*, 2016). 모든 모델을 시뮬레이션 할 필요가 없으므로 효율적으로 IEDS를 적용할 수 있다. 하지만 적절한 거리를 정의하는 것은 매우 중요하고 어려운 연구 중의 하나이다.

나) IEDS의 계산시간 감소를 위한 연구를 할 수 있다. 예를 들어 다수의 초기 앙상블에서 참조필드의 거동을 기준으로 모델들을 선별하고 그 평균 자체를 소프트데이터(soft data)로 사용하는 것이다(Lee *et al.*, 2017b). 이로써 Fig 2.3에서 두 번째부터 네 번째의 과정을 통합할 수 있다.

다) 정적자료는 한 지점에 대해 지정된 하나의 정보이고 소프트데이터는 한 지점에 대해 어떤 특성값을 가질 확률에 대한 정보이다. 소프트데이터를 사용한다면 저류층의 정보 손실 없이, 더 간단히 초기 앙상블을 생성할 수 있다. SNESim에서 정적자료와 소프트데이터에 대한 가중치를 정하는 것 또한 하나의 과제이다. 가중치에 따라서 초기 앙상블의 신뢰성이

달라질 것이다. 가중치 인자를 EnKF의 상태벡터에 추가하고 함께 교정할 수 있다. 기존연구에서도 새로운 인자를 상태벡터에 추가하여 예측성능을 개선한 사례가 있다(Thulin *et al*., 2007). 해당 방법이 검증된다면 더 발전된 초기 앙상블디자인 연구로 확장할 수 있다.

참고문헌

이경북. 2014. 거리기반 앙상블스무더를 이용한 채널저류층 특성화. 공학박사학위논문, 서울대학교, 서울, p. 34−36.

최종근. 2013. *지구통계학.* 서울: 시그마프레스, p. 7−8

Aanonsen, S.I., Nævdal, G., Oliver, D.S., Reynolds, A.C., and Vallès, B. 2009. The ensemble Kalman filter in reservoir engineering--a review. *SPE Journal* 14 (3): 393–412.

Ahmed, T. 2010. *Reservoir engineering handbook*. Burlington, Massachusetts: Gulf Professional Publishing, Elsevier, p. 871-872.

Devegowda, D., Arroyo-Negrete, E., and Datta-Gupta, A. 2007. Efficient and robust reservoir model updating using ensemble Kalman filter with sensitivity-based covariance localization. Paper SPE 106144 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium. Houston, Texas, USA, 26–28 February.

Economides, M.J., Hill, A.D., and Ehlig-Economides, C. 1994. *Petroleum Production Systems*, Englewood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice Hall, p. 23-68.

Evensen, G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. Journal of Geophysical Research 99(C5): 10143–10162.

Glegola, M., Ditmar, P., Hanea, R.G., Eiken, O., Vossepoel, F.C., Arts, R., and Klees, R. 2012a. History matching time-lapse surface-gravity and well-pressure data with ensemble smoother for estimating gas field aquifer support-a 3D numerical study. *SPE Journal* 17(4): 966–980.

Glegola, M., Ditmar, P., Hanea, R.G., Vossepoel, F.C., Arts, R., and Klees, R. 2012b. Gravimetric monitoring of water influx into a gas reservoir: a numerical study based on the Ensemble Kalman filter. *SPE Journal* 17(1): 163–176.

Gu, Y. and Oliver, D.S. 2004. History Matching of the PUNQ-S3 Reservoir Model using the Ensemble Kalman Filter. Paper SPE 89942 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 26-29 September.

Gu, Y. and Oliver, D.S. 2006. The ensemble Kalman filter for continuous updating of reservoir simulation models. In *Transactions of the ASME*, Vol. 128, Issue 1, 79-87. New York City: American Society of Mechanical Engineers.

Holtz, M.H. 2002. Residual gas saturation to aquifer influx: a calculation method for 3-D computer reservoir model construction. Paper SPE 75502 presented at the SPE Gas Technology Symposium. Calgary, Alberta, Canada, 30 April –2 May.

Houtekamer, P.L. and Mitchell, H.L. 1998. Data assimilation using an ensemble Kalman technique. *Monthly Weather Review* 126(3): 796–811.

Houtekamer, P.L., Mitchell, H.L., Pellerin, G., Buehner, M., Charron, M., Spacek, L., and Hansen, B. 2005. Atmospheric Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter: Results with Real Observations. *Monthly Weather Review* 133(3): 604–620.

Jafarpour, B., Goyal V.K., and Freeman W.T. 2008. Reconstruction of channelized facies using sparsity constraints. Paper SEG 2008-1546 presented at the 2008 SEG Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, USA, 9-14 November.

Jafarpour, B. and McLaughlin, D.B. 2007. Efficient permeability parameterization with the discrete cosine transform. Paper SPE 106453 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, Texas, USA, 26-28 February.

Jafarpour, B. and McLaughlin, D.B. 2008. History matching with an ensemble Kalman filter and discrete cosine parameterization. *Computational Geosciences* 12(2): 227-244.

Jafarpour, B. and McLaughlin, D.B. 2009. Reservoir characterization with the discrete cosine transform. *SPE Journal* 12(2): 227-244.

Jeong, H., Ki, S., and Choe, J. 2010. Reservoir characterization from insufficient static data using gradual deformation method with ensemble Kalman filter. *Energy Sources, Part A: Recovery Utilization & Environmental Effects* 32(10): 942-951.

Jung, S. and Choe, J. 2012. Reservoir characterization using a streamline-assisted Ensemble Kalman filter with covariance localization. *Energy Exploration and Exploitation* 30(4): 645–660.

Kang, B., Lee, K., and Choe, J. 2016. Improvement of ensemble smoother with SVD-assisted sampling scheme. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 141: 114-124.

Kim, S., Lee, C., Lee, K., and Choe, J. 2016. Characterization of channelized gas reservoirs using ensemble Kalman filter with application of discrete cosine transformation. *Energy Exploration and Exploitation* 34(2): 319–336.

Lee, C., Kim, S., Lee, K., Jo, K., Ryu, M., and Choe, J. 2015. Characterization of gas reservoirs with an aquifer using covariance localization in Ensemble Kalman filter. This paper presented at The 17th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences, Freiberg, Germany, 5–13 September.

Lee, K., Jeong, H., Jung, S., and Choe, J. 2013a. Characterization of channelized reservoir using Ensemble Kalman filter with clustered covariance. *Energy Exploration and Exploitation* 31(1): 17–29.

Lee, K., Jeong, H., Jung, S., and Choe, J. 2013b. Improvement of ensemble smoother with clustering covariance for channelized reservoirs. *Energy Exploration and Exploitation* 31(5): 713–726.

Lee, K., Jung, S., and Choe, J. 2016. Ensemble Smoother with Clustered Covariance for 3D Channelized Reservoirs with Geological Uncertainty. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 145: 423-435.

Lee, K., Jung, S., Lee, T., and Choe, J. 2017a. Use of Clustered Covariance and Selective Measurement Data in Ensemble Smoother for 3D Reservoir Characterization. *Journal of Energy Resources Technology* 139(2): 022905.

Lee, K., Kim, S., Jung, S., Shin, H., and Choe, J. 2014. Channelized Reservoirs characterization using ensemble smoother with selective measurement data. This Paper presented at 76th EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 16–19 June.

Lee, K., Lim, J., Choe, J., and Lee, H.S. 2017b. Regeneration of channelized reservoirs using history-matched facies-probability map without inverse scheme. *Journal of Petroleum Science and Engineering* (in press).

Lorentzen R.J., Flornes, K.M., and Nævdal, G. 2012. History matching channelized reservoirs using the ensemble Kalman filter. *SPE Journal* 17(1): 137-151

Nævdal, G., Mannseth, T., and Vefring, E.H. 2002. Near-well reservoir monitoring through Ensemble Kalman filter. Paper SPE 75235 presented at SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, 13–17 April.

Nejadi, S., Leung, J., and Trivedi, J.J. 2015. Characterization of Non-Gaussian Geologic Facies Distribution Using Ensemble Kalman Filter with Probability Weighted Re-Sampling. *Mathematical Geosciences* 47(2): 193-225.

Nejadi, S., Trivedi, J.J., and Leung, J. 2012a. Ensemble Kalman Filter Predictor Bias Correction Method for Non-Gaussian Geological Facies Detection. Paper 4020.00023 presented at the IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production, Trondheim, Norway, 31 May-1 June.

Nejadi, S., Trivedi, J.J., and Leung, J. 2012b. Estimation of Geological Facies Boundaries Using Categorical Indicators With P-Field Simulation and Ensemble Kalman Filter (EnKF). SPE Paper 153645 presented at the SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Mexico City, Mexico, 16-18 April.

Panwar, W., Trivedi, J.J., and Nejadi, S. 2015. Importance of Distributed Temperature Sensor Data for Steam Assisted Gravity Drainage Reservoir Characterization and History Matching Within Ensemble Kalman Filter Framework. *ASME Journal of Energy Resources Technology* 137(4): 042902 1-12.

Park, K. and Choe, J. 2006. Use of ensemble Kalman filter to 3-dimensional reservoir characterization during waterflooding. Paper SPE 100178 presented at SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 12-15 June.

Remy, N., Boucher, A., and Wu, J. 2009. *Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide*. New York City: Cambridge University Press. p. 169-177.

Peters, E., Wilschut, F., and Leeuwenburgh, O. 2011. Integrated workflow for computer assisted history matching on a channelized reservoir. Paper SPE 141659 presented at SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, 25-28 September.

Sarma, P. and Chen, W.H. 2009. Generalization of the ensemble Kalman filter using kernels for non-Gaussian random fields. Paper SPE 119177 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, 2-4 February.

Shin, Y., Jeong, H., and Choe, J. 2010. Reservoir characterization using an EnKF and a non-parametric approach for highly non-Gaussian permeability fields. *Energy Sources, Part A: Recovery Utilization & Environmental Effects* 32(16): 1569-1578.

Skjervheim, J.-A., Evensen, G., Hove J., and VabØ, J.G. 2011. An ensemble smoother for assisted history matching. Paper SPE 141929 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, 21-23 February.

Stenvold, T., Eiken, O., and LandrØ, M. 2008. Gravimetric monitoring of gas-reservoir water influx – a combined flow- and gravity-modeling approach. *Geophysics* 73(6): WA123–WA131.

Thulin, K., Li, G., Aanonsen, S.I., and Reynolds, A.C. 2007. Estimation of Initial Fluid Contacts by Assimilation of Production Data with EnKF. Paper SPE 109975 presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, USA, 11–14 November.

Vallès, B. and Nævdal, G. 2009. Revisiting Brugge Case Study Using a Hierarchical Ensemble Kalman Filter. Paper IPTC 14074 presented at International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 7-9 December.

Van Leeuwen, P.J. and Evensen, G. 1996. Data assimilation and inverse methods in terms of a probabilistic formulation. *Monthly Weather Review* 124(12): 2898–2913.

Yeo, M., Jung, S., and Choe, J. 2014. Covariance matrix localization using drainage area in an Ensemble Kalman filter. *Energy Sources, Part A* 36(19): 2154–2165.

부록 A. Eclipse 데이터파일

Eclipse 데이터파일을 케이스 1에 대해 대표로 수록한다. 케이스 1은 대수층이 없는 경우므로 MULTPV값들을 모두 1로 설정하고 나머지 케이스에서는 그에 맞는 값들을 삽입한다. 케이스 1~4 모두 물과 가스의 물성, 상대 유체투과율 곡선, 유정의 크기를 같은 조건으로 설정하였다. 한 격자의 크기, 유체투과율 값, 대수층인자 값 등은 케이스에 따라 달라지지만 그 외 조건들은 케이스에 상관없이 동일하다.

데이터파일은 크게 RUNSPEC, GRID, PROPS, SOLUTION, SUMMARY, SCHEDULE로 구성되며 각 항목은 다음과 같은 내용을 포함한다.

1) RUNSPEC: 시뮬레이션 제목, 격자의 차원수 등.
2) GRID: 격자의 크기, 공극률이나 유체투과율 등의 물성.
3) PROPS: 저류층의 암석 및 유체의 특성들.
4) SOLUTION: 저류층의 초기 조건 설정.
5) SUMMARY: 시뮬레이션 결과로부터 출력할 항목들.
6) SCHEDULE: 생산이나 주입 등의 시뮬레이션 설정.

```
RUNSPEC

TITLE
ECL
DIMENS
39 39 1 /
FIELD

GAS
WATER

START
10 MAR 2008 /
WELLDIMS
9 9 9 9 /

AQUDIMS
1000      1000      1000      1000      1000      10000/

UNIFOUT
UNIFIN

NSTACK
10/
-----------------------------------------------------------------------------------------
GRID
GRIDFILE
2 /
INIT

TOPS
1521*2700.0 /
DX
1521*250.0 /
DY
1521*250.0 /
DZ
1521*100.0 /

PORO
1521*0.15 /
```

```
INCLUDE
'PERMX.DAT' /
COPY
'PERMX' 'PERMY' /
/

INCLUDE
'MULTPV.DAT'/
--------------------------------------------------------------------------------------------
PROPS

PVDG
145     18.09752691     0.0115508
377     6.741571444     0.0119474
609     4.026930554     0.0124242
841     2.808365697     0.0130019
1073    2.116994735     0.0137148
1421    1.516253608     0.0150667
1770    1.165965382     0.0168804
2233    0.887604        0.0201331
2700    0.724722326     0.0241003
3500    0.568705259     0.0317623
3973    0.51740777      0.0360794
4322    0.491524756     0.0388448
5018    0.454033089     0.0437712
5482    0.440929151     0.0457288
/

PVTW
2000.0          1.00            5.00E-07    1.0    /

ROCK
2000.0        3.00E-05    /

DENSITY
48.623232       62.312542          0.06054    /
```

```
SWFN
0.25    0          50
0.3     0.000296 3          1*
0.35    0.002370 4          12
0.4     0.008      1*
0.45    0.018963           1*
0.5     0.037037           1*
0.55    0.064      9
0.6     0.10163  1*
0.65    0.1517     1*
0.7     0.216      1*
0.75    0.2963     1*
0.8     0.39437  1*
0.85    0.512      1*
0.9     0.65096  1*
0.95    0.81304  8
1       1          2
/

SGFN
0.2     0          0
0.25    0.003906 3          0
0.3     0.015625           0
0.35    0.035156           0
0.4     0.0625     0
0.45    0.097656           0
0.5     0.14063  0
0.55    0.19141  0
0.6     0.25       0
0.65    0.31641  0
0.7     0.39063  0
0.75    0.47266  0
/
-------------------------------------------------------------------------------------------
SOLUTION

INCLUDE
'SOLUTION.DAT' /

RPTSOL
'RESTART=2' /
```

```
--------------------------------------------------------------------------------------------
SUMMARY

RUNSUM
SEPARATE
RPTONLY

WOPR
'P1' 'P2' 'P3' 'P4' 'P5' 'P6' 'P7' 'P8' /

WGPR
'P1' 'P2' 'P3' 'P4' 'P5' 'P6' 'P7' 'P8' 'P9' /

WBHP
'P1' 'P2' 'P3' 'P4' 'P5' 'P6' 'P7' 'P8' 'P9' /

WWPR
'P1' 'P2' 'P3' 'P4' 'P5' 'P6' 'P7' 'P8' 'P9' /

FGPT

FWPT
--------------------------------------------------------------------------------------------
SCHEDULE
RPTSCHED
RESTART=2 /
RPTRST
BASIC=3 4* 1 21* 999999 /

WELSPECS
P1 ALL 8    8    1* GAS      3* NO /
P2 ALL 20 8    1* GAS      3* NO /
P3 ALL 32 8    1* GAS      3* NO /
P4 ALL 8    20 1* GAS      3* NO /
P5 ALL 20 20 1* GAS      3* NO /
P6 ALL 32 20 1* GAS      3* NO /
P7 ALL 8    32 1* GAS      3* NO /
P8 ALL 20 32 1* GAS      3* NO /
P9 ALL 32 32 1* GAS      3* NO /
/
```

```
COMPDAT
P1 8    8    1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P2 20 8    1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P3 32 8    1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P4 8    20 1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P5 20 20 1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P6 32 20 1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P7 8    32 1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P8 20 32 1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
P9 32 32 1 1 1* 1* 1.959178 1* 1* 1* 1* Z /
/

WCONPROD
P1        OPEN    GRAT    2*        10000/
P2        OPEN    GRAT    2*        10000/
P3        OPEN    GRAT    2*        10000/
P4        OPEN    GRAT    2*        10000/
P5        OPEN    GRAT    2*        10000/
P6        OPEN    GRAT    2*        10000/
P7        OPEN    GRAT    2*        10000/
P8        OPEN    GRAT    2*        10000/
P9        OPEN    GRAT    2*        10000/
/

WELTARG
P1        BHP      1000/
P2        BHP      1000/
P3        BHP      1000/
P4        BHP      1000/
P5        BHP      1000/
P6        BHP      1000/
P7        BHP      1000/
P8        BHP      1000/
P9        BHP      1000/
/

INCLUDE
'TSTEP.DAT' /

END
```

부록 B. 케이스 1~4의 특성화 결과

본문에서는 흐름 상 비슷한 맥락이거나 보이지 않아도 논리흐름에 지장이 없는 결과들은 제시하지 않았다. 부록 B에서는 본문에서 부록에 수록한다고 언급했던 특성화 결과들과 그 외 추가로 보일 결과들을 제시한다.

1) 케이스 1~4의 각 유정 별 가스 및 물 생산량(Figs. B.1~7).
2) 케이스 1~4의 단계 별 유체투과율 교정 과정(Fig. B.8).
3) 케이스 4의 두 번째와 세 번째 층에서 유체투과율 교정 예(Fig. B.9).

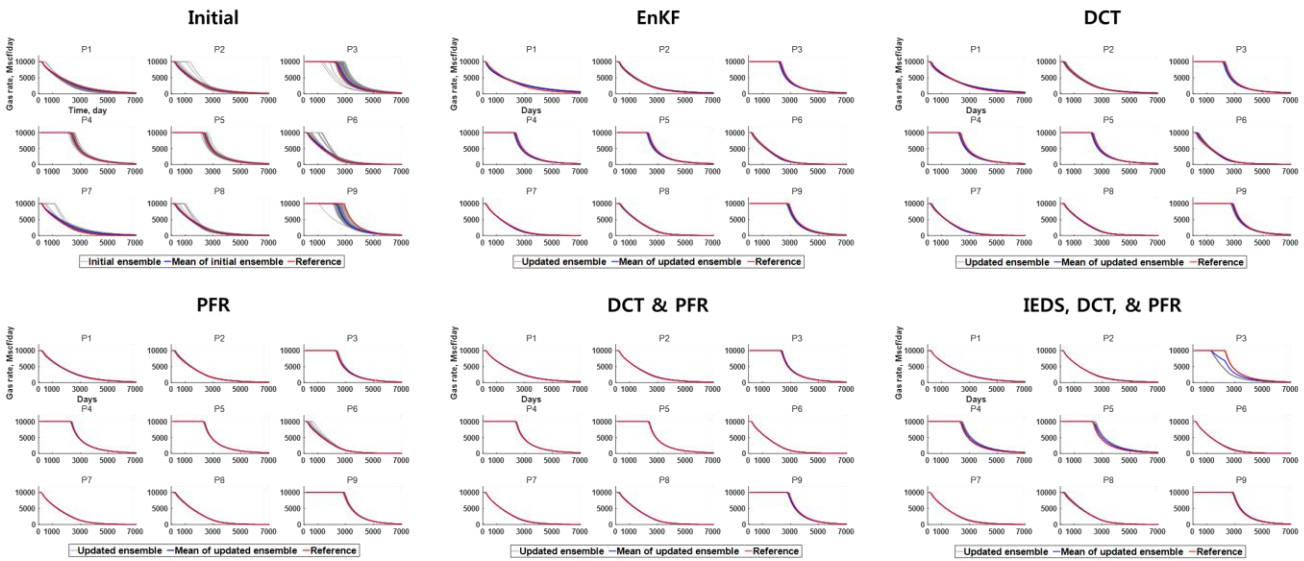


Figure B.1 Updated results of gas well productions in case 1.

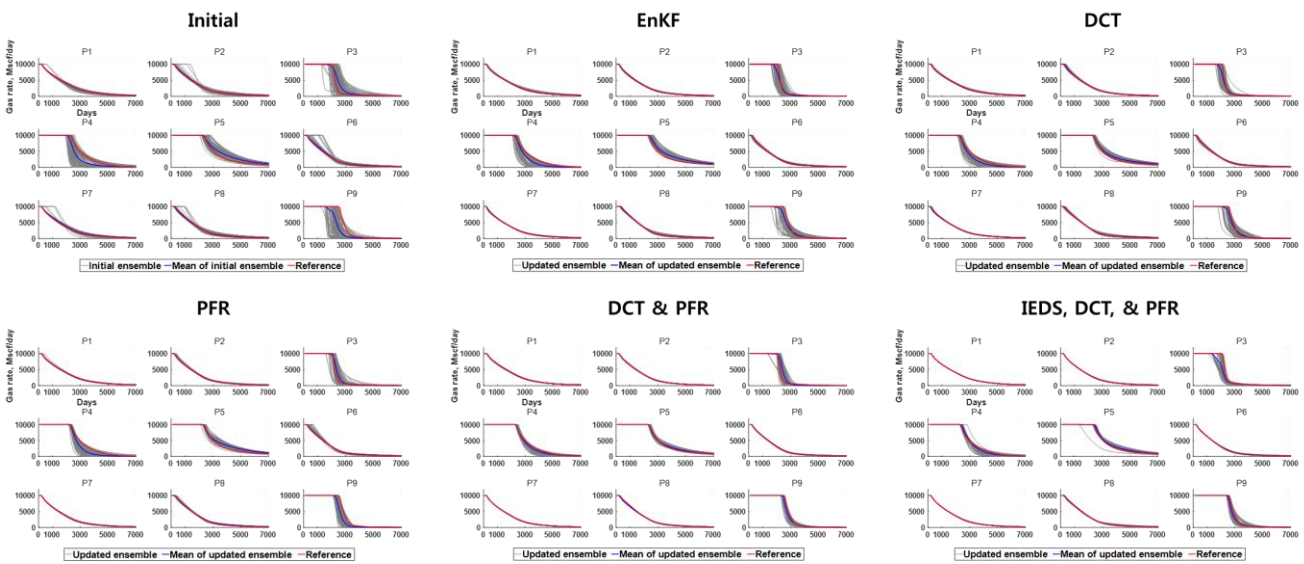


Figure B.2 Updated results of gas well productions in case 2.

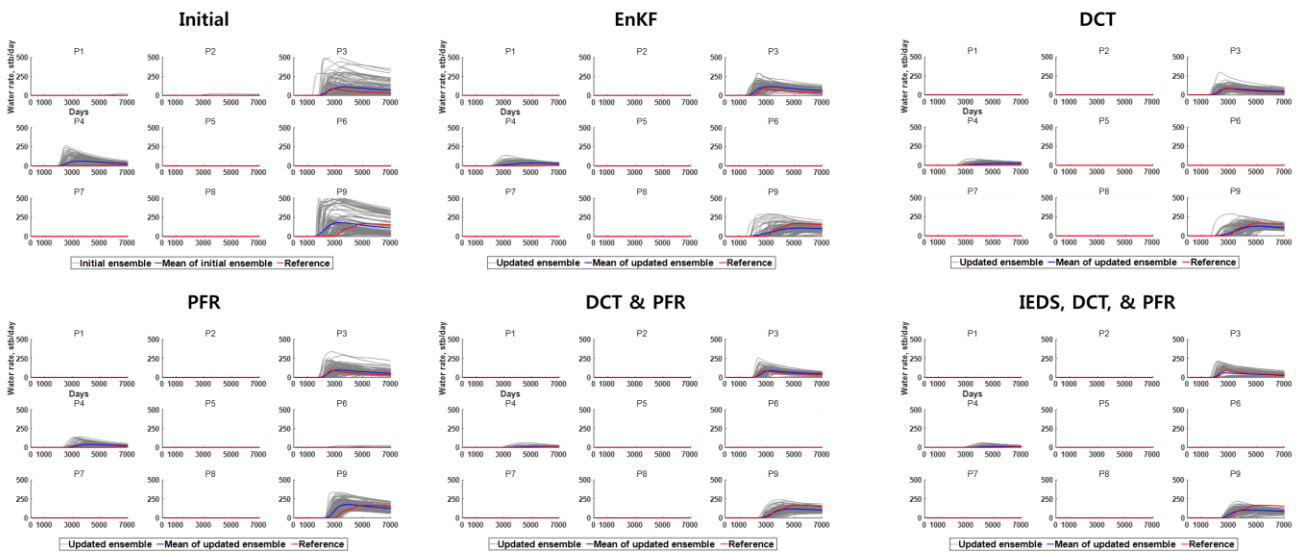


Figure B.3 Updated results of water well productions in case 2.

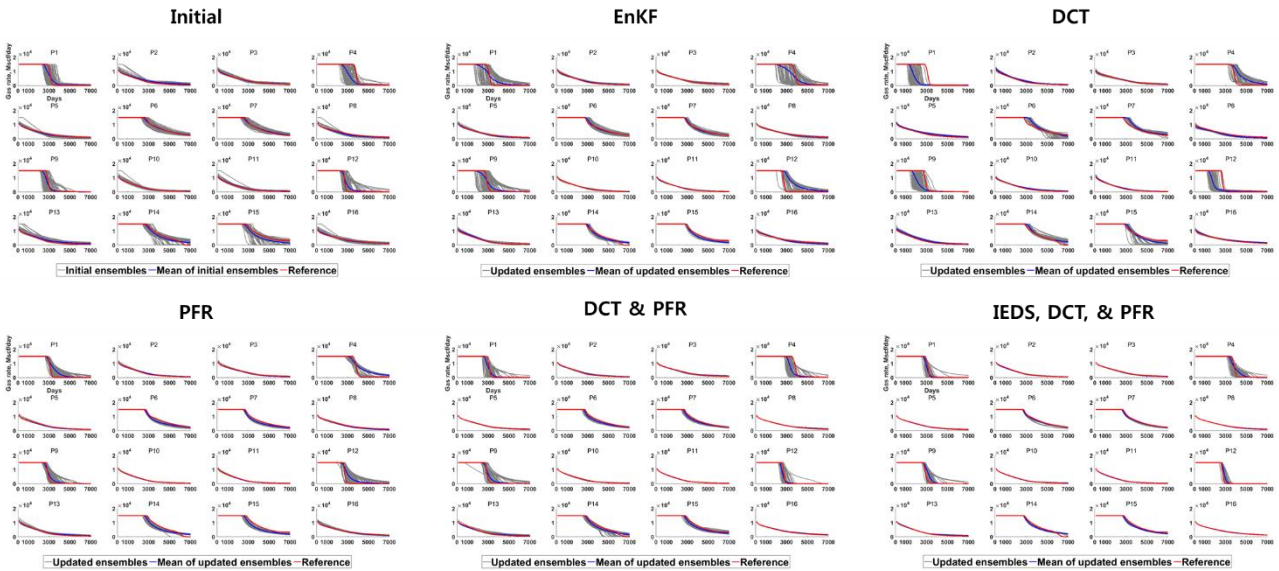


Figure B.4 Updated results of gas well productions in case 3.

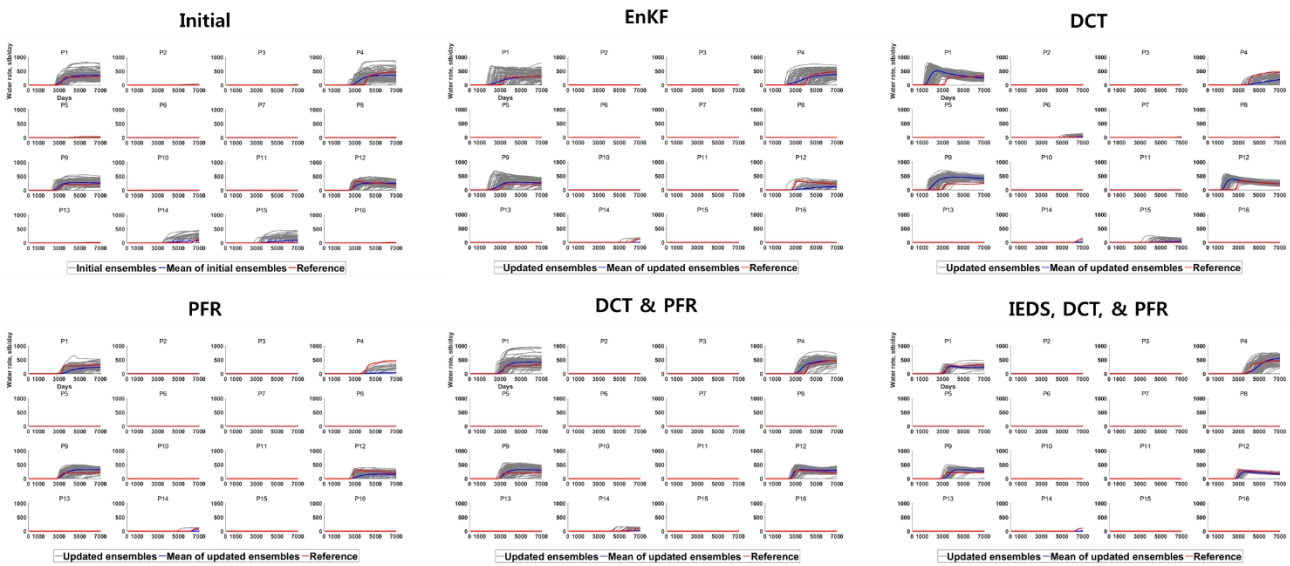


Figure B.5 Updated results of water well productions in case 3.

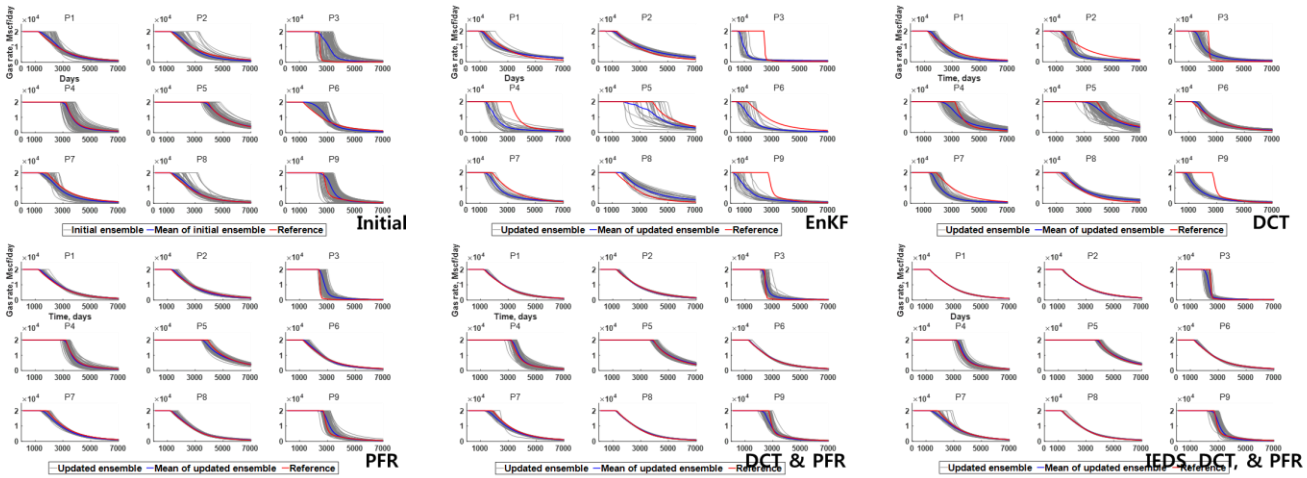


Figure B.6 Updated results of gas well productions in case 4.

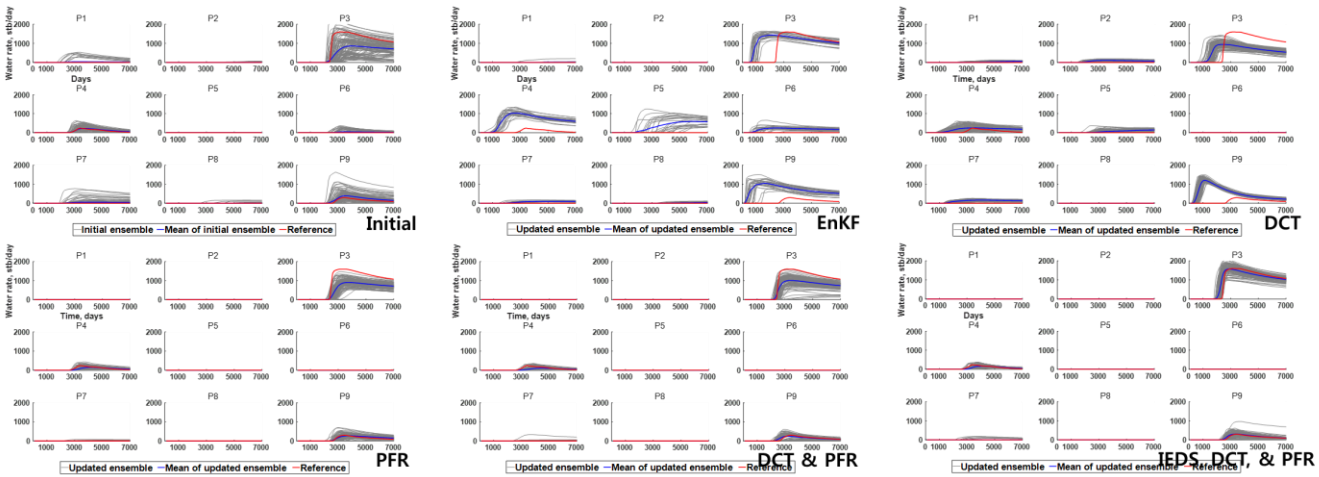
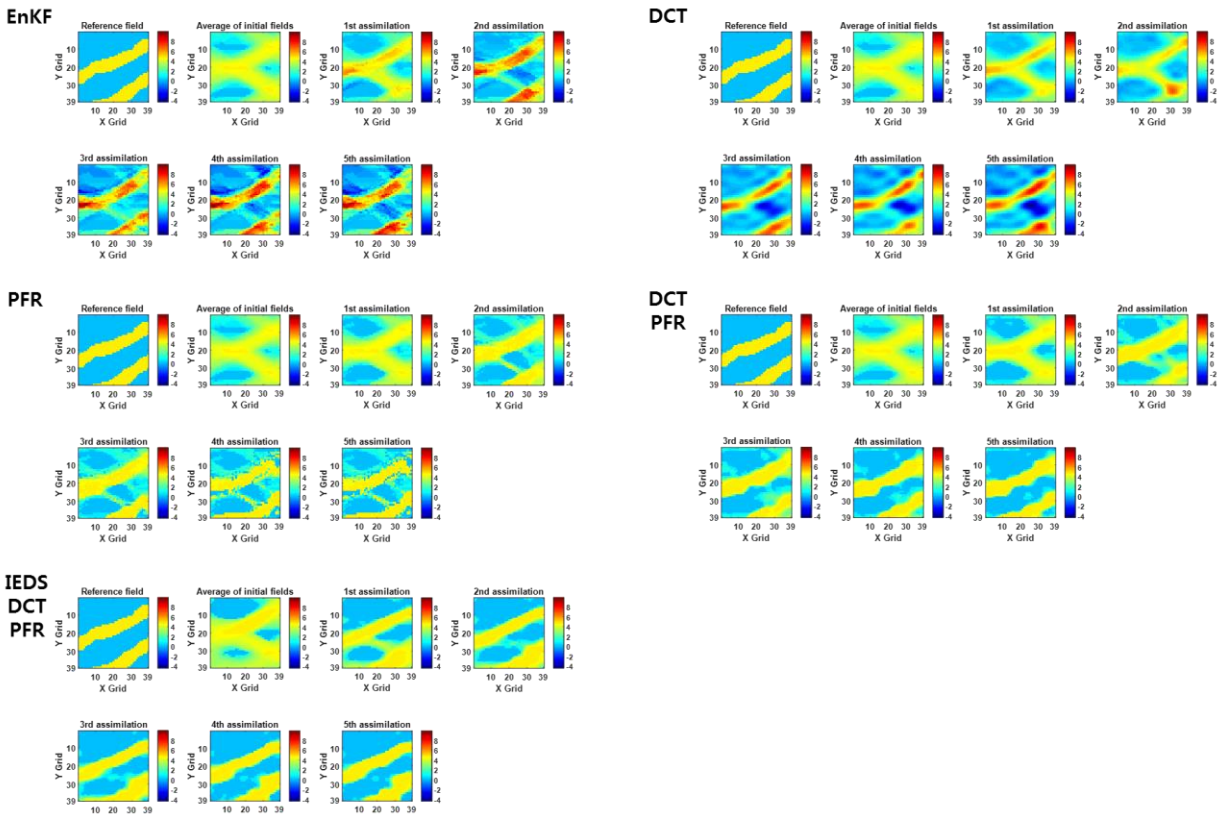
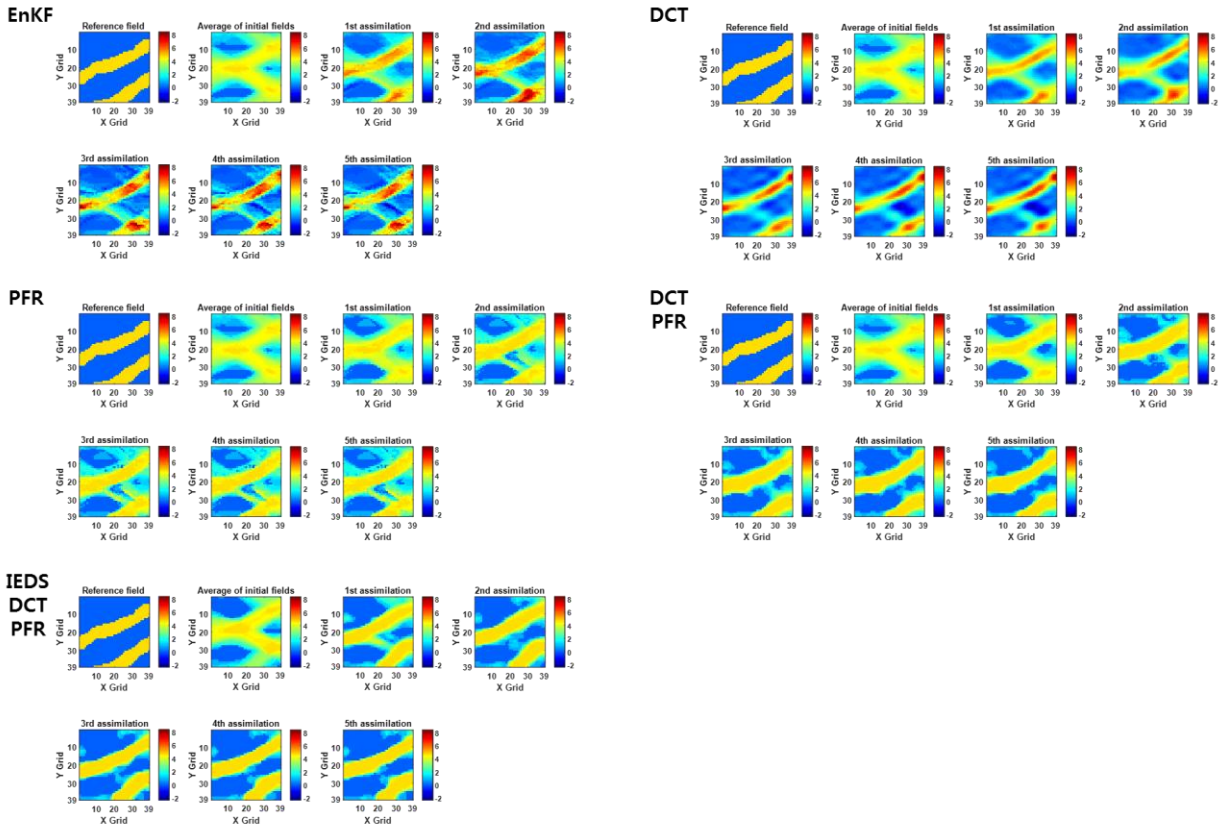


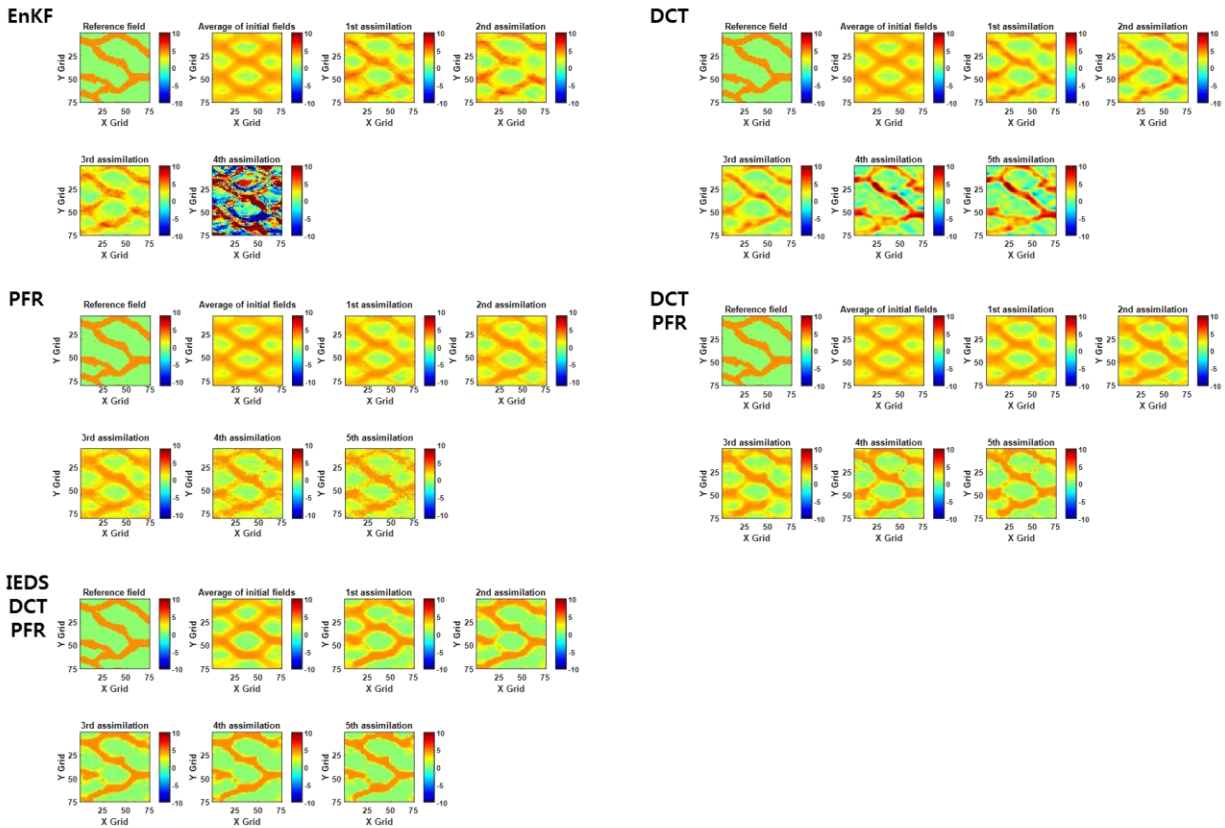
Figure B.7 Updated results of water well productions in case 4.


EnKF
Reference field
Average of initial fields
1st assimilation
2nd assimilation
3rd assimilation
4th assimilation
5th assimilation
X Grid
Y Grid
DCT
PFR
DCT
PFR
IEDS
DCT
PFR

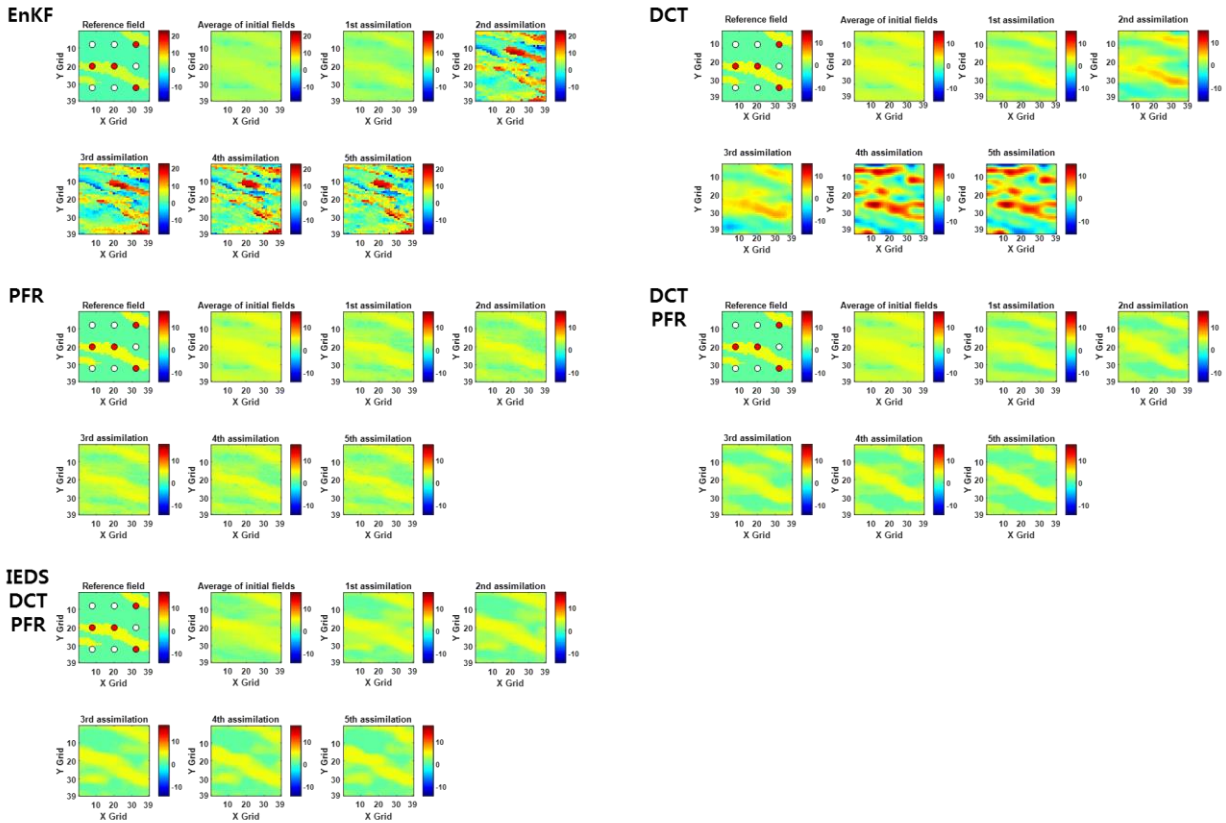
(a) Case 1


EnKF
DCT
PFR
DCT PFR
IEDS DCT PFR
Reference field
Average of initial fields
1st assimilation
2nd assimilation
3rd assimilation
4th assimilation
5th assimilation
Y Grid
X Grid

(b) Case 2

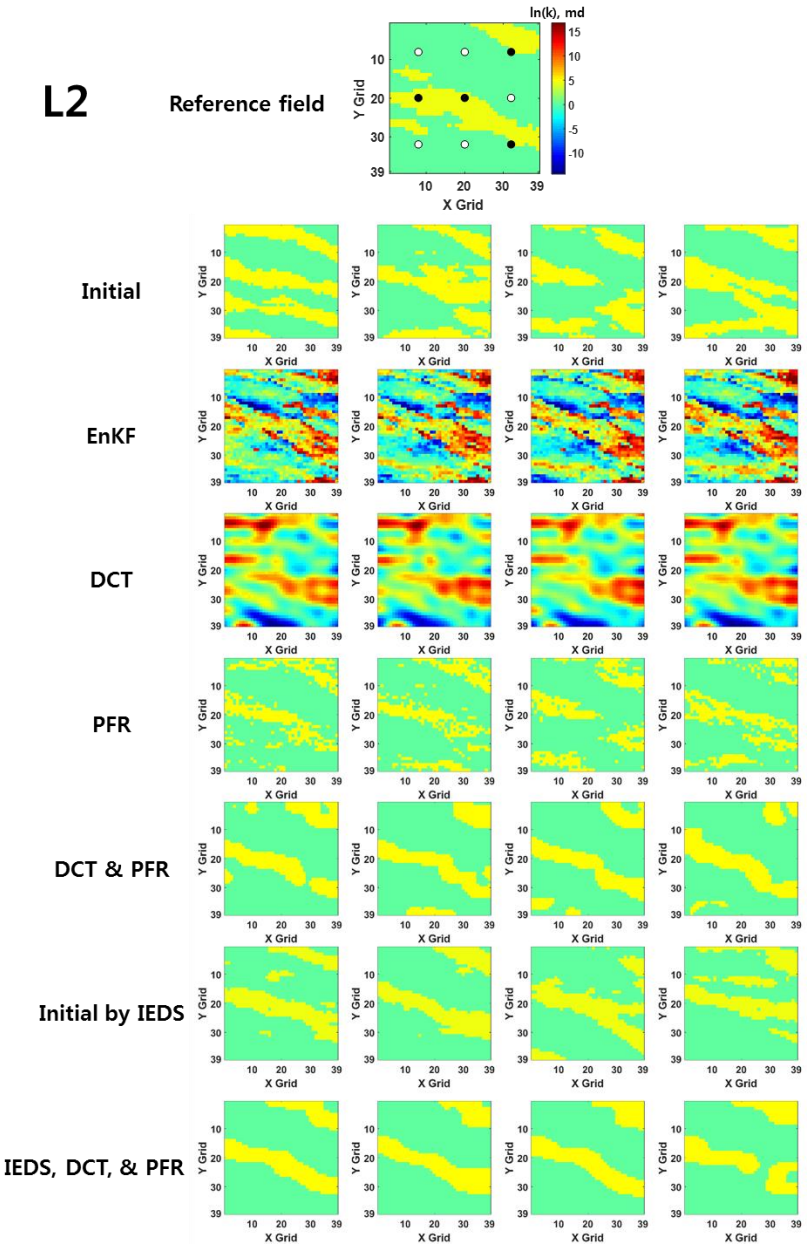

EnKF
Reference field
Average of initial fields
1st assimilation
2nd assimilation
3rd assimilation
4th assimilation
DCT
5th assimilation
PFR
DCT
PFR
IEDS
DCT
PFR
X Grid
Y Grid

(c) Case 3

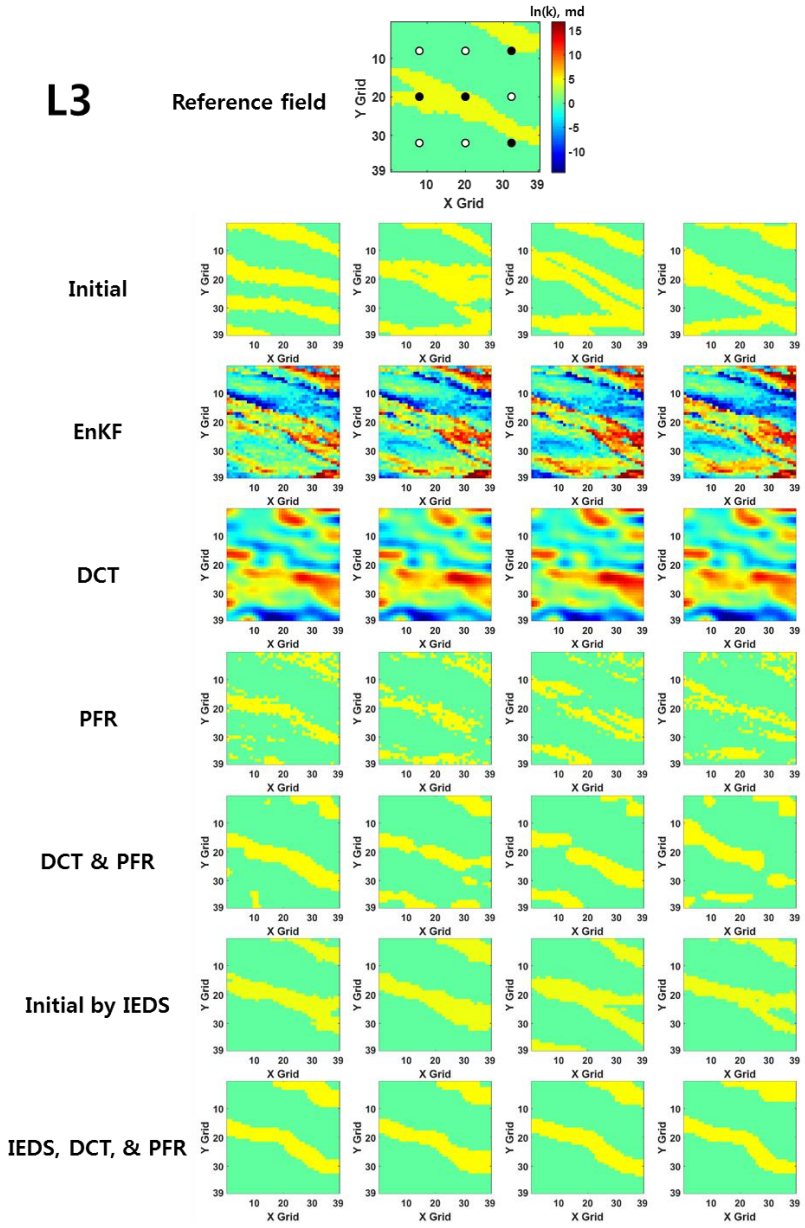


(d) L1 of Case 4

Figure B.8 Updated permeability results of all steps in case 1~4.


L2
Reference field
ln(k), md
15
10
5
0
-5
-10
Y Grid
X Grid
10
20
30
39
Initial
EnKF
DCT
PFR
DCT & PFR
Initial by IEDS
IEDS, DCT, & PFR

(a) Layer 2



(b) Layer 3

Figure B.9 Examples of permeability distribution results in layer 2 and 3 of case 4.

부록 C. 케이스 3의 IEDS 민감도분석

IEDS에서 두 개의 주요한 과정으로서 참조모델의 물생산거동과 가장 유사한 50개의 앙상블을 선별하는 것과 상위, 하위 각 200개의 지점을 뽑아 추가 정적자료로 사용하는 것이 있다(Fig. 2.3). 하지만 과연 몇 개의 앙상블과 정적자료를 뽑아야 하는지, 또는 그 개수에 따른 IEDS 결과의 차이는 어떤가에 대해 의문을 가질 수 있다. 따라서 IEDS에서 요소들의 개수가 바뀔 때 IEDS가 보이는 성능의 변화 및 안정성을 분석하였다. 부록 C는 IEDS의 민감도분석을 케이스 3의 필드에서 수행한 결과를 제시한다. 결과로서 유체투과율, 초기 및 교정 물 누적생산량, 정규화된 오차 수치를 보일 것이다.

Fig. C.1은 여러 IEDS 케이스의 평균 유체투과율 특성화 결과이다. 가로축은 추가로 사용하기 위해 뽑은 정적자료의 수, 세로축은 400개 앙상블 중에서 선별한 모델의 수이다. 비교를 위해 제일 위에는 참조필드와 DCT 및 PFR 결합기법 결과를 함께 나타내었다. 각 민감도분석 결과는 (300, 30)과 같이 정적자료 수와 선별된 앙상블 수의 순서대로 나타낸다. (300, 30), (400, 70)의 결과를 제외한다면 대부분의 유체투과율 분포가 참조필드와 같이 S자 패턴과 안정된 채널 연결성을 제시한다. DCT와 PFR 결합기법의 결과에 비해서 더 선명한 패턴을 보인다.

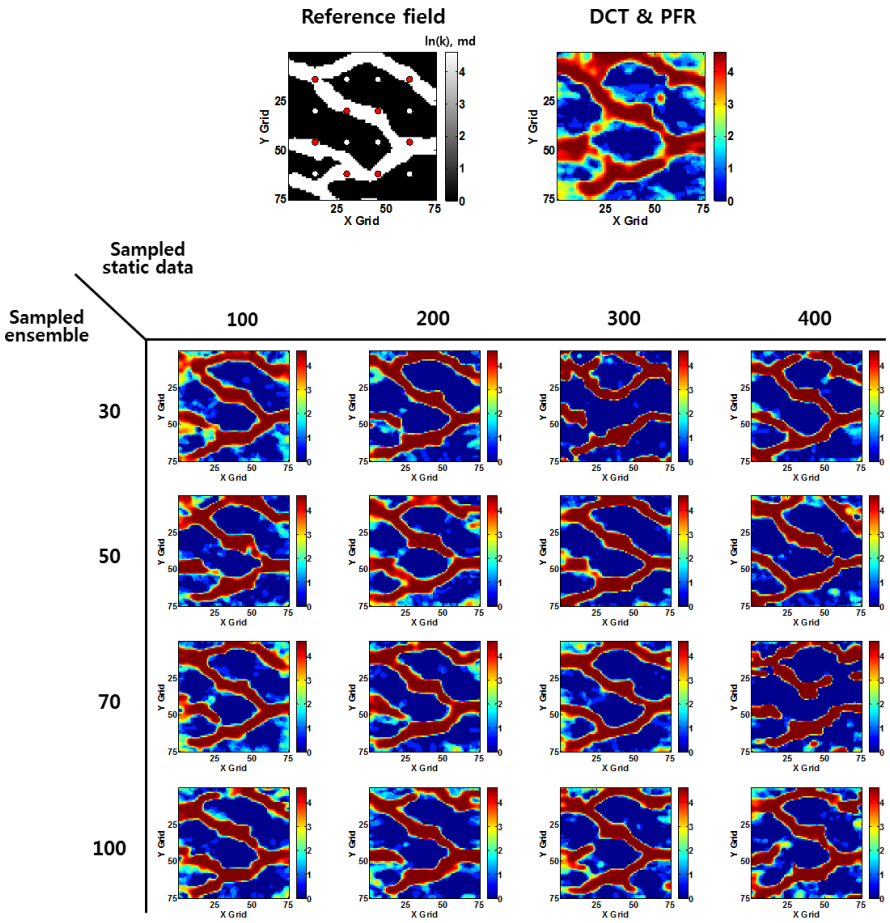
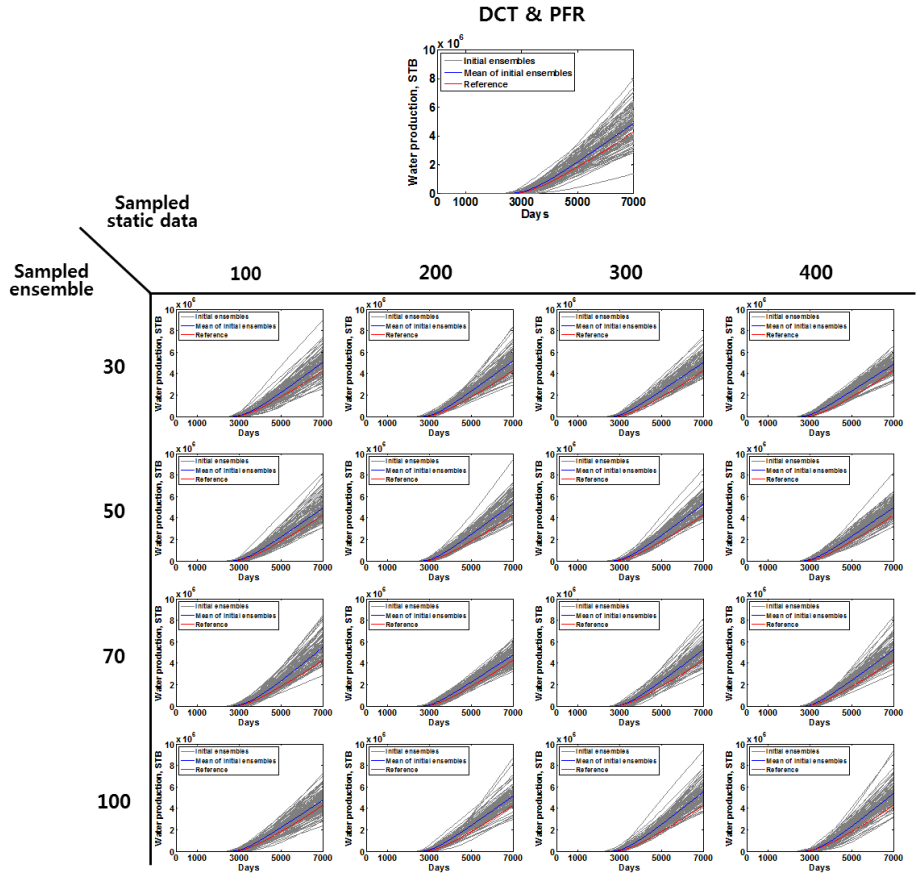


Figure C.1 Permeability distribution results of sensitivity analysis in case 3.

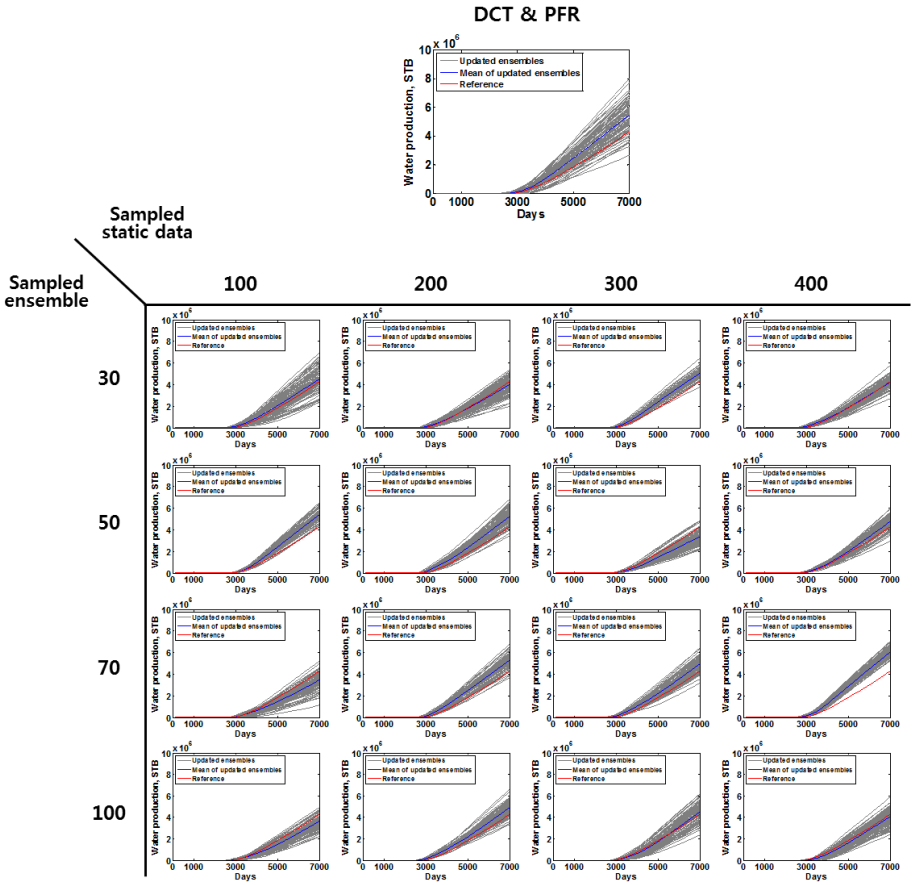
Fig. C.2는 초기모델과 교정 모델의 물 누적생산량 예측결과이다. Fig. C.2a는 IEDS를 적용한 후의 교정 전 앙상블이다. IEDS를 통해 초기모델이 달라지므로 이러한 변화를 DCT와 PFR 결합기법에서 쓴 초기모델(Fig. C.2의 맨 위)과 비교하는 것 또한 의미 있다. 경우에 따라 다르지만 교정이 아닌 IEDS만으로 불확실성을 감소시키고 있다. 교정된 모델의 예측결과가 아닌 초기모델만으로 IEDS의 신뢰성을 짐작할 수 있다.

Fig. C.2b는 초기모델을 교정한 것이다. DCT와 PFR 결합기법은 불확실성이 감소했으나 평균 앙상블의 거동이 참조모델에서 더 벗어나는 모습을 보인다. IEDS의 결과들은 (400, 70) 케이스를 제외한다면 모두 향상된 예측성능을 제시한다. 전체적으로 봤을 때 정적자료 수나 선별 앙상블 수의 증감에 의해서 일관된 경향을 보이진 않는다. 정량적인 기준에서 각 케이스의 성능을 파악하고 경향을 분석하기 위해 Table C.1과 같은 결과를 제시한다.



(a) Initial ensemble

Figure C.2 Total water prediction results of initial and updated ensemble by sensitivity analysis in case 3.



(b) Updated ensemble

Figure C.2 Total water prediction results of initial and updated ensemble by sensitivity analysis in case 3.

Table C.1은 각 케이스들에 대해서 참조모델에서 벗어난 정도를 기준으로 각 인자에 대한 RMSE를 계산하고 모든 값을 평균하여 나타낸 것이다. 각 인자의 항목은 다음과 같다.

1) 유정의 가스생산량.
2) 유정의 물생산량.
3) 가스 누적생산량.
4) 물누적생산량.
5) 유체투과율.
6) 대수층 강도.

6개 항목에 대해 RMSE를 계산한다. 각 항목에서 최대와 최소를 기준으로 식 (C.1)과 같이 정규화한다. 정규화된 6개의 RMSE값을 평균하면 하나의 값을 얻게 되고 각 케이스에 대해 나타내면 Table C.1의 결과를 얻는다.

$$RMSE_{normalized} = \frac{RMSE - Min}{Max - Min} \tag{C.1}$$

Table C.1에서는 그 값이 클수록 참조모델의 거동이나 양상과는 거리가 멀고 특성화 성능이 떨어진다는 의미다. DCT와 PFR 결합기법의 결과값도 계산하여 보였다. 3.04보다 크다면 이보다 성능이 못하다는 것인데 (300, 30), (400, 70) 두 개의 경우를

제외한다면 모든 결과는 그보다 작은 값들을 갖는다.

IEDS를 사용한다면 일반적인 EnKF뿐만 아니라 DCT와 PFR 결합보다 더 개선된 특성화 결과를 보인다. 또한 16개의 케이스 중 14개의 케이스, 즉 90% 정도에서 개선된 결과를 보이므로 본 기법은 안정성을 갖는다고 판단할 수 있다.

Table C.1 Normalized errors compared to the reference in sensitivity analysis

앙상블수\정적자료	100	200	300	400	
30	2.88	1.05	3.60	1.12	**DCT & PFR =3.04**
50	2.45	2.53	1.89	1.40	**Min=1.05 (200, 30)**
70	1.55	1.92	1.35	5.65	**Max=5.65 (400,70)**
100	2.57	1.64	1.85	1.46	

.

ABSTRACT

Reservoir characterization is a procedure of making reliable models by integration of available information. Although EnKF (ensemble Kalman filter) has many advantages, it is hard to preserve channel properties such as channel pattern and connectivity on discrete grid system. Especially, EnKF does not provide stable history matching results due to high uncertainty of channel reservoirs with an aquifer.

In this research, the three schemes are combined with EnKF: IEDS (initial ensemble design scheme), DCT (discrete cosine transform), and PFR (preservation of facies ratio). Then the method is applied to gas channel reservoirs with and without an aquifer. IEDS selects initial models, which well predict water behaviors of the reference field, and extracts grids for additional static data from 5% of high and low ranks of an averaged selected fields. Consequently, this procedures play a critical role for getting stable characterization results because it suggests reliable initial ensemble from limited geologic information. DCT, which extracts essential trend, lets us figure out overall channel pattern and PFR can effectively make sure of channel connectivity.

The proposed method is applied to four cases to test its applicability: with and without an aquifer, large scale reservoir, and 3D cases. The suggested method can maintain channel properties and bi-modal distribution and solve over-/under-shooting problem in cases of high uncertainty and a large number of grids. Moreover, it presents successful history matching by proper estimation of aquifer factors. The proposed method can be helpful for making proper and reasonable decisions in operation of petroleum production.

Keywords: ensemble Kalman filter, initial ensemble design scheme, discrete cosine transform, preservation of facies ratio, gas channel reservoirs
Student number: 2013-30994