



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](#)

공학석사학위논문

유선시뮬레이션을 이용한
주입정 위치 최적화

**Optimization of an Injection Well
Using Streamline Simulation**

2015년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

강 민 철

유선시물레이션을 이용한
주입정 위치 최적화

Optimization of an Injection Well
Using Streamline Simulation

지도교수 최 종 근

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

강 민 철

강민철의 석사학위논문을 인준함

2015년 2월

위 원 장 박 형 동 (인)

부 위 원 장 최 종 근 (인)

위 원 송 재 준 (인)

초 록

1차 생산을 통해 생산되는 석유자원의 양은 매우 제한적이다. 오일저류층의 경우 석유회수율을 높이기 위해 저류층에 물을 인위적으로 주입하는 수공법을 사용한다. 따라서 오일생산량을 높이기 위해서는 주입한 물의 접촉효율(sweep efficiency)을 최대화하는 주입정의 위치를 찾아야 한다.

수공법의 효율성을 최대화하기 위해 주입정에서 각 생산정까지의 물 도달시간을 일치시키는 방법을 제안하였다. 물 도달시간을 유선 시뮬레이션으로 계산하고 생산정까지 거리에 대한 물 도달시간의 변화를 민감도로 사용해 주입정의 위치를 갱신하였다. 더 이상 주입정의 위치변화가 없을 때 최적 주입정의 위치로 선정하였다.

제안한 방법을 통해 상위 3% 이내 누적오일생산량을 나타내는 주입정의 위치를 찾았다. 시작점에 상관없이 안정적으로 일정한 위치로 수렴하였고 3~6회의 반복계산으로 최적위치를 얻었다. 따라서 제안한 방법을 사용하면 신뢰할 수 있는 주입정의 위치를 신속하게 결정할 수 있다.

주요어: 주입정 위치 최적화, 접촉효율, 물 도달시간 일치, TOF(time of flight)

학 번: 2013-21004

목 차

초 록	i
목 차	ii
List of Tables	iv
List of Figures	v
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	6
2.1 유선시뮬레이션	6
2.2 도달시간 최적화	9
2.3 민감도행렬	12
3. 물 도달시간 일치를 이용한 주입정 위치 최적화	16
3.1 주입정 위치 최적화과정	16
3.2 주입정 위치 갱신과정	22
4. 연구결과	27
4.1 참조필드	27
4.2 제안한 방법의 타당성 검증	34
4.3 다른 유체투과율 필드에서의 적용	43

5. 결 론	50
참고문헌	52
ABSTRACT	54

List of Tables

Table 3.1 Calculation of an injector coordinate during the 1st iteration	24
Table 3.2 Calculation of an injector coordinate during the 2nd iteration	25
Table 3.3 Calculation of an injector coordinate during the 3rd iteration	26
Table 4.1 Grid properties of the reference field	29
Table 4.2 Fluid properties of the reference field	29
Table 4.3 Geostatistical data	32
Table 4.4 Production well data	32

List of Figures

Fig. 1.1 Water saturation progress by well placements	2
Fig. 2.1 Schematic of streamline simulation through a 2D grid block	8
Fig. 2.2 Watercut of individual wells and the desired watercut as the average of all watercuts	11
Fig. 2.3 Mass flow rate of water through a linear volume element	12
Fig. 2.4 Determination of saturation at the water front	15
Fig. 3.1 Steps of the proposed method	17
Fig. 3.2 TOF calculations from the injector to P1~P4 wells	18
Fig. 3.3 Shifting time ($\Delta t_1 \sim \Delta t_4$) calculations	19
Fig. 3.4 Calculation of the coordinate of an injection well (INJ)	20
Fig. 3.5 Result of the injection well positioning	21
Fig. 4.1 Log permeability distribution of the reference field	30
Fig. 4.2 Generated streamline distribution of the reference field	30
Fig. 4.3 Relative permeability curves	31
Fig. 4.4 Histogram of log permeability	31
Fig. 4.5 Position of four production wells	33
Fig. 4.6 Movement of an injection well from (3,19) during iterations	34
Fig. 4.7 Results of an optimal shifting time from initial location (3,19)	35
Fig. 4.8 Movement of an injection well during iterations	36
Fig. 4.9 Results of an optimal shifting time from initial location (3,3)	37
Fig. 4.10 Results of an optimal shifting time from initial location (19,3)	38
Fig. 4.11 Results of an optimal shifting time from initial location (19,19)	39
Fig. 4.12 Change of variation of TOF during iterations	41

Fig. 4.13 Distributions of both var(TOF) and FOPT values.....	42
Fig. 4.14 Correlation between var(TOF) and FOPT	42
Fig. 4.15 Log permeability distribution of the various reference fields	44
Fig. 4.16 Histogram of log permeability	45
Fig. 4.17 Change of var(TOF) during iterations for case 1	46
Fig. 4.18 Movements of an injection well during iterations for case 1	46
Fig. 4.19 Distributions of both var(TOF) and FOPT values for case 1	47
Fig. 4.20 Correlation between var(TOF) and FOPT for case 1	47
Fig. 4.21 Change of var(TOF) during iterations for case 2	48
Fig. 4.22 Movements of an injection well during iterations for case 2	48
Fig. 4.23 Distributions of both var(TOF) and FOPT values for case 2	49
Fig. 4.24 Correlation between var(TOF) and FOPT for case 2	49

1. 서론

저류층의 자체 에너지만을 사용하여 오일을 생산하는 것을 1차 생산이라 한다. 2차 생산은 저류층 내에 인공적인 에너지를 주어 1차 생산에서 채취되지 않은 오일을 생산하는 것이다. 일반적으로 1차 생산효율은 대부분 20% 이내이며 2차 생산을 통하여 약 35~45%까지 생산효율을 높일 수 있다(Zitha 등, 2011). 신규유전의 탐사와 개발이 점차 줄고 있는 상황에서 경제적인 석유생산을 위해 기존 생산유전의 석유회수율을 높이는 것은 필수적이다.

수공법은 인위적으로 물을 주입하여 석유의 회수율을 증진시키는 대표적인 2차 생산기법이다. 현재 대부분의 오일저류층에서 가장 보편적으로 적용되는 수공법은 CO₂공법, 스팀공법, 화학공법보다 적용이 쉽고 경제적이다. 수공법의 성공여부는 저류층에 대한 물의 접촉효율을 얼마나 증가시키느냐에 달려 있다. 저류층의 불균질성은 수공법 수행에 막대한 영향을 미치므로 저류층의 특성을 고려하여 수공법을 실시해야 한다. 또한 절대투과율이 낮은 지역의 오일도 회수될 수 있도록 주입정의 위치를 선정해야 한다.

Fig. 1.1은 주입정의 위치에 따른 물 포화도 변화양상을 비교한 것이다. 대상필드는 우측상단에 붉은색의 높은 유체투과율 분포가 있고 좌측하단에는 파란색의 낮은 유체투과율 분포가 있는 정사각형 필드이다. 가운데 그림은 필드 중앙에 주입정을 위치시켰을 때 주입된 물이 퍼져나가는 초기모습을 보여준다. 이때 오른쪽 위의 그림과 같이 주입정이 생산정 2번 근처에 위치하면 유체투과율 분포가 낮은 생산정 3번 근처에 물이 이동하지 않는다. 그 결과 생산정 3번 근처에 잔존하는 오일은 생산되지 않는다.

그 아래 그림은 주입정을 생산정 3번 쪽에 설치했을 경우로 생산정 3번을 포함해 전 생산정에 물이 균일하게 이동한 것을 볼 수 있다. 그 결과 필드 내 잔존하는 오일을 잘 밀어주고 더 높은 누적오일생산량을 갖게 된다. 따라서 오일생산량을 높이기 위해서는 수공법의 효율을 최대화할 수 있는 주입정의 위치를 찾아야 한다.

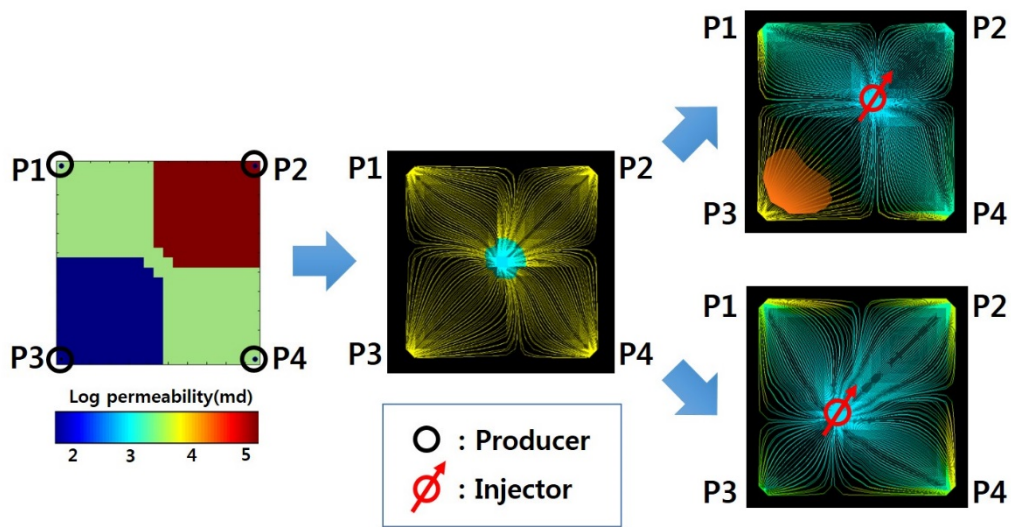


Fig. 1.1 Water saturation progress by well placements

최적의 유정위치를 결정하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. 최적의 주입정과 생산정의 위치와 개수를 알아내기 위해 유전알고리즘(genetic algorithm, GA), 인공신경망(artificial neural network, ANN) 등과 같은 비변화율기반 최적화방법이 먼저 연구되었다. 왜냐하면 이들은 여러가지 제약조건을 만족하면서 누적오일생산량 또는 순현재가치(net present value, NPV)를 최대화하기 위해 다수의 시나리오를 평가할 수 있기 때문이다.

Bittencourt와 Horne(1997)는 GA를 유정위치 최적화 연구에 적용하였다. GA기법은 염색체와 유사한 자료구조로 부호화된 잠재적인 해의 모집단을 관리하면서 최적해를 찾는다. 주어진 자료구조에 재조합연산자를 적용하여 새로운 후보해를 찾고 평가함수를 이용하여 최적해를 선정한다(Choe, 2013). 이 방법을 생산정 또는 주입정, 수직정 또는 수평정을 결정하는 유정조합과 그 위치결정에 이용하였다.

Centilmen 등(1999)은 처음 ANN을 생산정 최적화 연구에 도입하였다. ANN은 뉴런(노드)과 시냅스(링크)의 네트워크 결합으로서 학습규칙을 통해 시냅스의 가중치를 결정해 스스로 문제해결능력을 갖는 기법이다. 뇌의 대규모 병렬처리, 정보의 분산표현방식 특성을 모사하여 자료의 패턴분석, 수학적 모델링이 어려운 문제의 최적화 등에 사용된다. 이 방법을 사용해 다양한 유전패턴과 저류층물성 조건하에서 누적생산량을 최대화하는 생산정의 위치를 찾았다.

Güyağüler 등(2002)은 생산정 위치가 고정된 상태에서 1~4개까지 주입정의 물 주입률을 변화시켜 NPV를 최대화하는 주입정의 위치를 탐색하였다. 이때 GA와 함께 폴리톱(polytope) 알고리즘, 크리깅(kriging), ANN 등을 결합하여 최적의 조합을 결정하고 시뮬레이션 속도와 효율성을 증가시켰다.

Min(2007)은 ANN을 학습시킬 때 입력자료로 저류층의 상대적 생산성에 대한 정보를 제공하는 품질지도(quality map)를 사용하였다. 품질지도는 계산량을 줄이기 위해 유체투과율, 공극률, 오일포화도 등을 곱해서 큰 값이 나오는 지역을 생산성 잠재력이 높은 위치로 분리해내는 기법이다. 이 방법을 사용해 생산정이 1~3개까지 추가될 때 최적 위치를 찾았다.

Emerick 등(2009)은 발전된 GA를 이용해 다양한 제한조건 하에서 생산정과 주입정의 수량, 위치, 궤도를 동시에 최적화하는 방법을 제안하였다. 생산정은 최대생산유량, 최저공저압, 최대워터컷에 대해 그리고 주입정은 최대주입량, 최대공저압에 대해 제한조건을 정하였다. 또한 최대유정개수, 최대수평정길이, 최소유정간거리를 지정해 제한조건하에서 NPV를 최대로 하는 생산시나리오를 구하였다.

비변화율기반 최적화방법은 다수의 지역적 최소값이 존재하는 경우에 광역적 최소값을 찾는 데 유용하다. 또한 변수 상호간의 관계가 복잡하고 함수에 대한 사전지식이 부족한 경우에도 적용할 수 있다. 그러나 이 방법은 타당한 알고리즘의 구현에 많은 시간과 계산량이 소모되는 한계점이 있다. 또한 필드의 규모가 커지고 유정의 수가 많아질 때 가능한 해의 조합이 많아져 계산효율이 더 낮아진다.

Handels 등(2007)은 주입정 위치 최적화 연구에 변화율기반 최적화방법인 수반행렬방법(adjoint method)을 처음 도입하였다. 수반행렬방법은 임의의 시작점을 둘러싼 8개의 가상 주입정에 대해 NPV의 변화율을 계산한다. 8개 중 변화율이 가장 큰 위치가 주입정의 이동방향이 되고 그 방향으로 한 칸 이동하는 방법이다. 이 과정을 반복해 주입정이 더 이상 이동하지 않을 때 최종 위치가 결정된다.

Møyner 등(2014)은 수반행렬방법과 저류층내 유량변화를 빠르게 예측하는 프록시모델(proxy model)을 결합하여 오일생산량, 물주입량, 주입정의 위치를 동시에 최적화하는 방법을 제안하였다. 생산정 위치는 고정된 상태에서 여러 개의 주입정이 있을 때 먼저 1개의 주입정을 최적화한다. 더 이상 NPV가 증가하지 않을 때 순차적으로 다음 주입정의 위치를 최적화한다. 그 결과 모든 주입정이 더 이상 이동하지 않게 되면 그

때의 주입정 배치상태가 최종 위치가 된다.

수반행렬방법은 해석해를 사용하기 때문에 계산이 빠르지만 수학적으로 복잡하다. 시작점에서 출발하여 위치이동시 변위방향만 결정하고 변위크기는 결정하지 못한다. 따라서 필드규모가 커지고 저류층이 불균질할수록 이동방향이 자주 변하여 계산량이 빠르게 증가한다. 또한 시작점에 민감하여 지역적 최소값으로 수렴할 수 있는 한계를 갖는다.

본 연구에서는 계산이 빠르고 시작점에 관계없이 안정적으로 최적의 주입정 위치를 결정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 수공법 적용시 물 접촉효율을 최대화하기 위해 각 생산정까지 물이 도달하는 시간을 일치시키는 주입정 위치를 찾는다. 참조필드 내 전 격자에 대한 누적오일생산량과 비교하여 본 기법의 타당성을 검증하고자 한다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 1장 서론에서는 본 연구의 필요성을 설명하고 기존 연구방법의 한계를 파악한다. 2장에서는 연구에 사용된 유선시물레이션, 도달시간 최적화, 민감도행렬에 대해 설명한다. 3장에서는 TOF(time of flight)값을 이용해 주입정의 위치를 최적화하는 방법을 제안한다. 4장에서는 불균질성이 강한 참조필드에 제안한 방법을 적용하고 결과의 신뢰성과 안정성에 대해 분석한다. 5장에서는 본 연구의 결론을 요약한다.

2. 이론적 배경

2.1 유선시뮬레이션

유선시뮬레이션은 저류층의 3차원 공간상의 유체유동을 1차원 유선의 합으로 묘사하는 시뮬레이션 기법이다. 이는 기존의 저류층 시뮬레이션 기법들에 비해 많은 장점을 갖고 있다. 먼저 기존의 기법에 비해 계산속도가 빠르다. 또한 대상 저류층이 크고 불균질성이 심할수록 상대적인 연산효율이 높아진다. 이는 1차원 TOF 좌표계로 변환하는 과정에서 불균질성이 고려되므로 유동방정식 계산에서 수치적 분산과 격자방향성 효과(grid-orientation effect)가 감소하기 때문이다(Datta-Gupta, 2000).

유선시뮬레이션은 식 (2.1)으로 정의되는 TOF를 사용한다. TOF는 중성 유체입자가 기준점에서 유선을 따라 임의의 위치에 도달하는 시간을 의미한다. 이때 유선이란 운동하는 유체의 각 점에서 속도벡터의 방향이 접선방향이 되도록 그은 곡선이다. 이 정의를 이용하면 다공질매질에서의 3차원 유체유동을 1차원 유선의 합으로 분해하여 풀 수 있다.

$$\tau = \int \frac{d\xi}{v} = \int \frac{\phi}{u} d\xi \quad (2.1)$$

where,

τ : TOF(time of flight)

v : interstitial velocity

ϕ : porosity

u : darcy velocity

ξ : spatial coordinate along the streamline

여기서 주입정으로부터 거리가 멀거나 해당 위치까지의 유동용이도가 낮을수록 TOF가 증가한다. 이러한 성질로 인해 TOF는 물리적 거리뿐만 아니라 유체투과율, 공극률과 같은 유동용이도까지 대표하는 거리인자로 활용할 수 있다(Batycky 등, 1997).

Fig. 2.1은 한 요소 내에서의 유선추적 모식도이다. 압력장이 결정되면 Darcy 방정식으로 속도장을 계산할 수 있으며 유체입자의 유동을 따라 유선을 추적할 수 있다. 압력장이 결정된 시점에서 유선추적 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 유동영역 내에서의 시작점을 설정한다.
- 2) 시작점이 속해있는 격자를 결정하고 격자 내의 속도장을 선형보간법으로 계산한다.
- 3) 한 격자 내에서의 입구좌표, 출구좌표, TOF를 계산한다.
- 4) 다음 격자에서의 출구좌표를 이전 격자의 입구좌표로 설정하고 위의 과정을 반복한다.

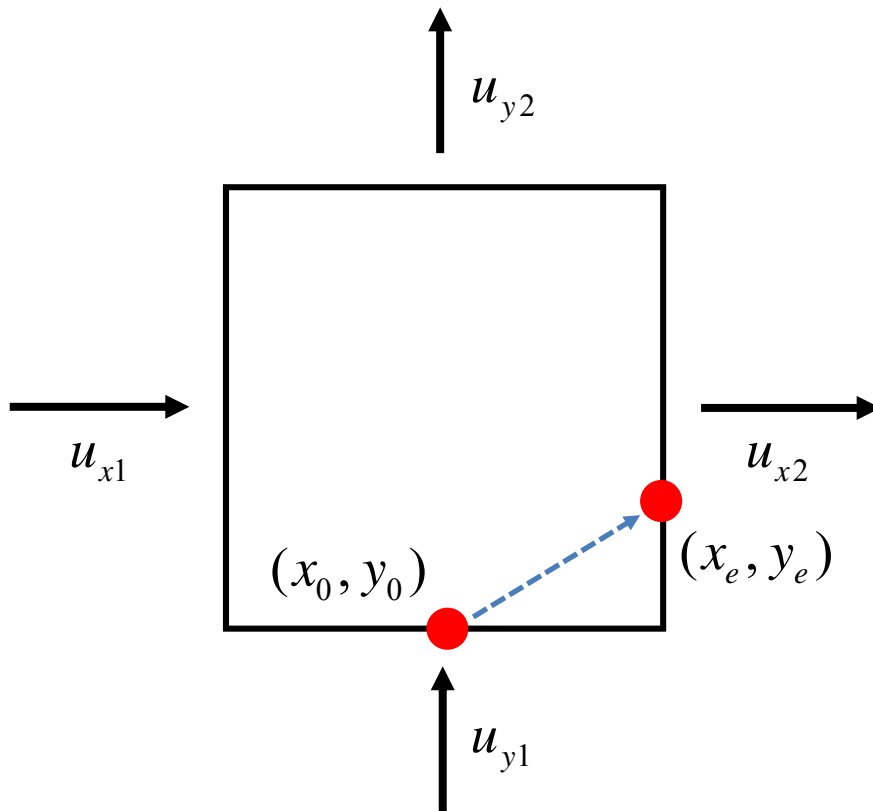


Fig. 2.1 Schematic of streamline simulation through a 2D grid block (Park, 2014)

2.2 도달시간 최적화

제안한 방법의 아이디어는 각 생산정까지의 물 도착시간을 일치시켜 수공법의 물 접촉효율을 최대화하는 것이다. 식 (2.2)는 각 개별 생산정까지의 물 도달시간 차이이다. 여기서 벡터 x 는 주입정의 위치이고 i 번째 생산정까지 거리를 결정한다.

$$e(x) = t_d - t_i(x) \quad (2.2)$$

각 생산정까지 전체 물 도달시간의 차이를 식 (2.3)과 같이 목적함수로 설정하였다.

$$\|e(x)\|^2 = \sum_{i=1}^{N_{prod}} (t_d - t_i(x))^2 \quad (2.3)$$

where,

t_d : the arrival time of desired watercut

t_i : calculated watercut

N_{prod} : the number of production wells

x : injection well location

목적함수를 최소화하기 위해 식 (2.3)을 식 (2.4)과 같이 나타내었다.

$$\min_x J(x) = \frac{1}{2} \|e(x)\|^2 \quad (2.4)$$

테일러전개를 통해 식 (2.4)는 식 (2.5)로 표현할 수 있다. 여기서 k 는 반복연산 회수이다.

$$\min_{\delta x} J(x) = J(x^k) + \nabla J(x^k) \delta x + \frac{\nabla^2 J(x^k)}{2} (\delta x)^2 \quad (2.5)$$

유체투과율의 불균질성이 낮다고 가정하면 식 (2.5)는 식 (2.6)으로 표현할 수 있다.

$$\min_{\delta x} \|e(x^k) - S(x^k) \cdot \delta x\| \quad (2.6)$$

여기서 민감도행렬(sensitivity matrix)은 식 (2.7)로 표현된다. 민감도는 생산정까지 거리의 대한 물 도착시간의 변화를 의미하며 아래첨자 i 와 j 는 각각 i 번째와 j 번째 생산정을 의미한다.

$$S_{i,j}(x^k) = \frac{\partial t_i(x^k)}{\partial x_j}, \quad \forall i = j \quad (2.7a)$$

$$S_{i,j}(x^k) = 0, \quad \forall i \neq j \quad (2.7b)$$

식 (2.7a)에 연쇄법칙과 Buckley-Leverett 방정식을 적용하면 식 (2.8)을 구할 수 있다. Buckley-Leverett 방정식은 1차원에서 2상 유체유동에 관한 이송방정식이다. 식 (2.8)의 분모는 포화속도(saturation speed)로서 물의 전단면(water front)에서 계산한다. 한편 분자의 물 도달시간에 대한 TOF 민감도는 TOF의 평균값을 생산정까지의 거리로 나눈 값이 된다.

$$S(x^k) = \frac{\partial t}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{1}{\left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w}\right)^k} \cdot \frac{1}{n} \frac{\sum \tau^k}{x^k} \quad (2.8)$$

식 (2.6)에서 $e(x^k)$ 는 생산정의 물 도달시간 차이(shifting time)를 의미한다. 즉, 두 워터컷곡선 사이에 물이 처음 생산된 생산일의 차이이다(Fig. 2.2). 주입정에 대해 총 4개의 물 도달시간 차이가 존재한다. 주입정의 위치를 변화시켜 얻고자 하는 목표워터컷곡선(desired watercut)은 각 생산정의 워터컷곡선을 평균한 곡선(붉은 색)이다. 그림에서 목표워터컷선은 약 700일 경부터 처음 물이 생산되기 시작한다.

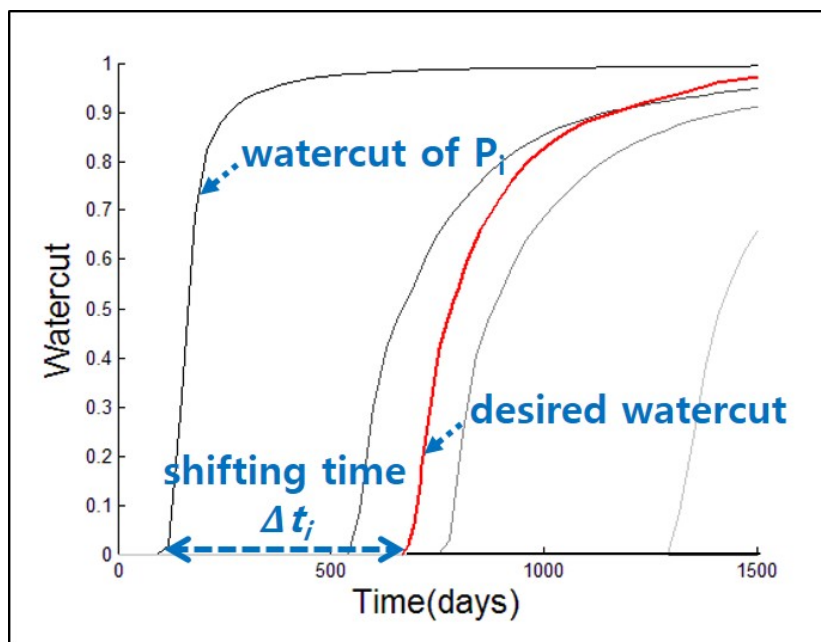


Fig. 2.2 Watercut of individual wells and the desired watercut
as the average of all watercuts

2.3 민감도행렬

민감도란 일반적으로 입력변수의 변동에 대한 출력변수의 변화량을 의미한다. He 등(2002)은 도달시간 민감도를 계산하기 위해 야코비안 행렬(Jacobian matrix)을 사용하였다. Buckley-Leverett 방정식의 해석해에서 1차원 거리좌표계를 1차원 TOF좌표계로 대신하여 1차원 TOF좌표계에서의 이송방정식을 계산하였다. 또한 Alhuthali 등(2007)은 최적 물주입량을 계산하기 위해 물주입량에 대한 민감도행렬을 구하였다. 따라서 물포화도의 균일한 전파를 표현하면 생산정까지 거리에 대한 물 도달시간에 대한 민감도를 계산할 수 있다.

Buckley-Leverett 방정식은 1차원에서의 물과 오일에 대한 유동방정식으로서 물과 오일은 혼합되지 않으며 물에 의해 오일이 이동하는 것을 가정한다. Fig. 2.3과 같이 길이 Δx 와 시간 Δt 에 대해 물질평형을 고려한 연속방정식을 식 (2.9)로 나타내었다.

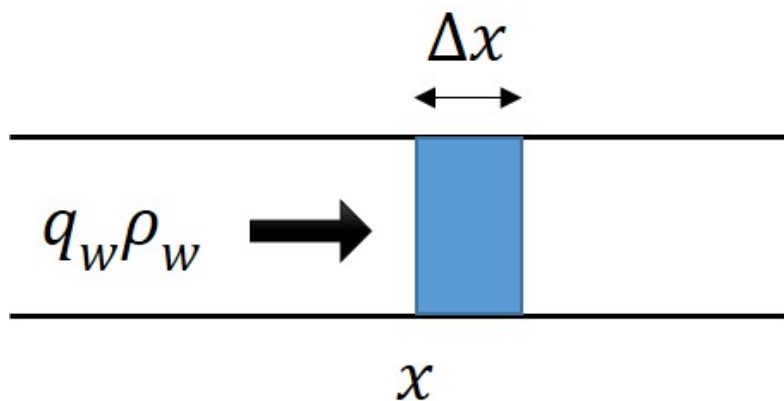


Fig. 2.3 Mass flow rate of water through a linear volume element

식 (2.9)의 좌변은 위치 x 에서 유동에 의한 질량변화를 나타낸다. 우변은 검사체적 안에서의 시간 Δt 동안 늘어난 질량의 변화를 나타낸다.

$$\begin{aligned} & [(q_w \rho_w)_x - (q_w \rho_w)_{x+\Delta x}] \Delta t \\ & = A \Delta x \phi [(S_w \rho_w)^{t+\Delta t} - (S_w \rho_w)^t] \end{aligned} \quad (2.9)$$

where,

q_w : water fluid rate

ρ_w : water viscosity

A : cross sectional area of controlled volume

ϕ : porosity

S_w : water saturation

이때 Δx 와 Δt 가 모두 0으로 수렴한다고 하면 식 (2.10)과 같은 연속방정식으로 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial}{\partial x}(q_w \rho_w) = A \phi \frac{\partial}{\partial t}(S_w \rho_w) \quad (2.10)$$

물의 압축성을 무시하면 물의 밀도 ρ_w 는 일정하다. 또한 식 (2.11)과 같이 유동유체에서의 물의 비율인 f_w (fractional flow of water)의 정의를 이용하면 식 (2.10)을 식 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_w = f_w q \quad (2.11)$$

$$-\frac{df_w}{dx} = \frac{A \phi}{q} \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (2.12)$$

한편 식 (2.1)의 TOF 정의를 1차원 공간상에서 해석적 미분을 하면 식 (2.13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{A \phi}{q} \quad (2.13)$$

식 (2.12)는 TOF 값인 τ 와 연쇄법칙을 이용해 식 (2.14)로 다시 나타낼 수 있고 식 (2.13)을 이용해 식 (2.15a)로 정리할 수 있다.

$$-\frac{\partial f_w}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{A\phi}{q} \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_w}{\partial \tau} = 0 \quad (2.15a)$$

$$\frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial f_w}{\partial S_w} \frac{\partial S_w}{\partial \tau} = 0 \quad (2.15b)$$

한편 물포화도 S_w 는 시간 t 와 거리 x 의 함수이므로 식 (2.16)과 같이 표현할 수 있다.

$$dS_w = \frac{\partial S_w}{\partial t} dt + \frac{\partial S_w}{\partial x} dx \quad (2.16)$$

물 포화도가 균일한 전단면 전파를 표현하기 위해 dS_w 는 0으로 두고 TOF 값인 τ 와 연쇄법칙을 이용하여 다음과 같은 식으로 변형한다.

$$0 = \frac{\partial S_w}{\partial t} dt + \frac{\partial S_w}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial x} dx \quad (2.17)$$

식 (2.17)을 식 (2.15b)에 대입하면 식 (2.18)로 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \left(\frac{\partial \tau}{\partial x} \right) / \left(\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \right) \quad (2.18)$$

따라서 Buckley-Leverett 방정식을 이용하여 도달시간 최적화에서 설명한 민감도행렬 식 (2.7)을 식 (2.19)과 같이 유도할 수 있다.

$$S_{i,j}(x^k) = \frac{\partial t_i(x^k)}{\partial x_j}, \quad \forall i = j \quad (2.19a)$$

$$S_{i,j}(x^k) = 0, \quad \forall i \neq j \quad (2.19b)$$

식 (2.19)는 민감도행렬에서 생산정 i 와 생산정 j 가 동일할 때 유의미하다. 따라서 여기서 j 를 주입정으로 나타내면 민감도행렬은 식 (2.20)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{i,j} = \frac{1}{N_{sl,i,j}} \sum_{l=1}^{N_{sl,i,j}} \frac{\partial \tau_{l,i,j}}{x_j} / \left[\frac{df_w}{dS_w} \right]_{S_{wf,l}} \quad \text{if } N_{sl,i,j} \neq 0 \quad (2.20a)$$

$$S_{i,j} = 0 \quad \text{if } N_{sl,i,j} = 0 \quad (2.20b)$$

한편 식 (2.12)에서 f_w 는 S_w 의 함수이므로 식 (2.21)와 같이 표현할 수 있으며 식 (2.17)을 식 (2.21)에 대입하면 식 (2.22)와 같다.

$$-\frac{\partial f_w}{\partial S_w} \frac{\partial S_w}{\partial x} = \frac{A\phi}{q} \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (2.21)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{q}{A\phi} \frac{df_w}{dS_w} \quad (2.22)$$

식 (2.22)를 t에 대해 적분하면 식 (2.23)과 같이 전단면 위치에 대한 식으로 나타낼 수 있고 이 식을 통해 분모의 포화속도를 구할 수 있다.

$$x_f = \frac{qt}{A\phi} \left(\frac{df_w}{dS_w} \right)_f \quad (2.23)$$

또한 포화속도는 x축이 S_w , y축이 f_w 인 그래프에서 초기 물포화도 값을 지나는 접선을 그렸을 때 접선의 기울기 값으로 표현된다(Fig. 2.4).

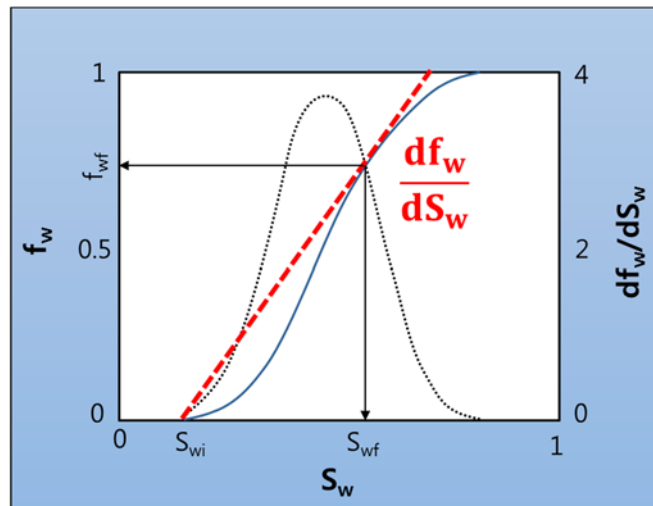


Fig. 2.4 Determination of saturation at the water front

3. 물 도달시간 일치를 이용한 주입정 위치 최적화

3.1 주입정 위치 최적화과정

주입정 위치 최적화의 궁극적인 목적은 효율적이고 안정적인 알고리즘을 구축하여 다양한 유전조건에 대해 신뢰할 수 있는 누적오일생산량을 찾는 것이다. 앞서 2장에서 설명한 물 도달시간 최적화와 민감도행렬을 이용해 주입정 위치 최적화과정을 순서도로 나타내었다(Fig. 3.1).

제안한 방법은 총 4단계로 구성된다.

- 1) 주입정의 시작점 좌표에서 각 생산정까지의 물 생산시간을 계산한다. 상용 유선시뮬레이터를 이용해 물 도달시간과 민감도행렬을 구한다.
- 2) 워터컷곡선을 이용해 주입정의 위치를 최적화한다. 목표워터컷곡선을 참값으로 사용해 물 도달시간 차이를 계산하고 반복법으로 그 차이를 줄인다.
- 3) 생산일수로 구한 시간차이를 주입정의 위치이동으로 변환한다. 이때 1단계에서 구한 민감도행렬을 이용해 새로운 주입정의 좌표를 계산한다.
- 4) 위의 과정을 반복해 주입정의 위치변화가 없을 때 최적 주입정 위치로 선정한다.

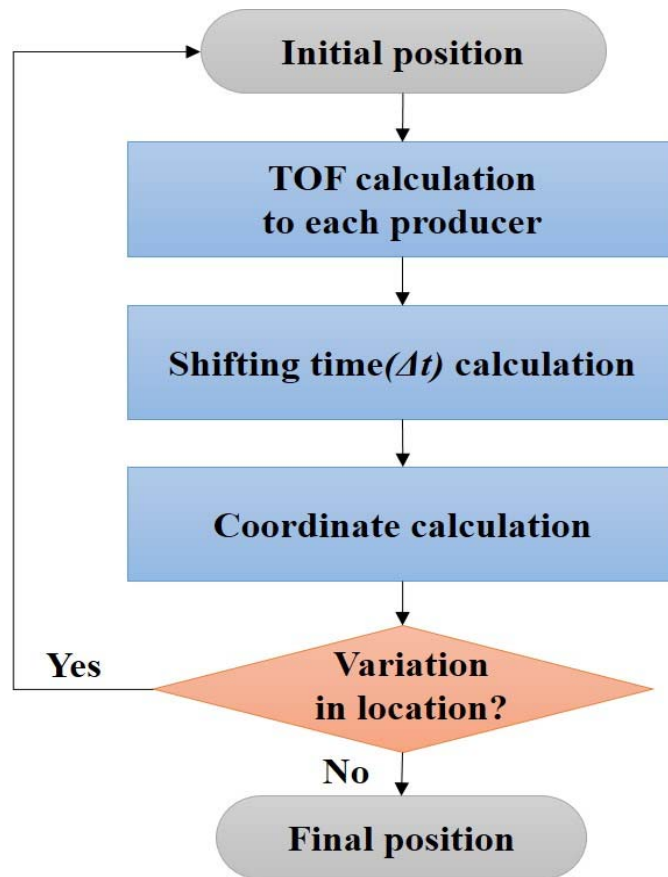


Fig. 3.1 Steps of the proposed method

Fig. 3.2는 순서도의 1단계로서 생산정까지 물 도착시간을 TOF 값으로 구하는 단계이다. 현재 필드 크기는 21×21 이고 균질한 유체투과율 분포를 가진 2차원 필드이다. 주입정의 시작점은 격자 (6,4)이다. 주입정을 기준으로 현재 생산정 1번이 가장 가깝고 생산정 4번은 가장 멀리 떨어져 있다. 생산정 2번은 생산정 3번보다 조금 더 가깝다.

주입정에서 시작해 생산정으로 향하는 파란 곡선은 주입한 물입자가 시간을 따라 이동하는 경로인 유선을 나타낸다. 본 연구에서는 유선과 TOF를 쉽게 이용할 수 있는 상용 유선시뮬레이터인 Schlumberger사의 FrontSim을 사용하였다. 현재 생산정 4번까지의 TOF 값이 가장 크고 생산정 1번까지의 TOF 값이 가장 작다.

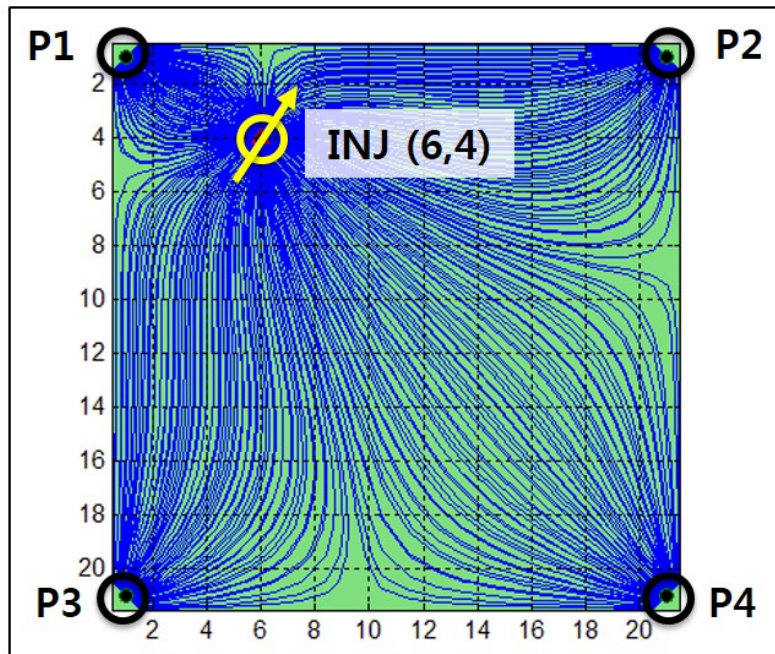


Fig. 3.2 TOF calculations from the injector to P1~P4 wells

2단계는 주입정의 위치를 최적화하기 위해 물 생산시간 차이를 줄이는 단계이다. Fig. 3.3은 x축은 생산일수, y축은 생산된 유체에서 물이 차지하는 비율인 워터컷을 나타낸다. 생산정이 4개이므로 4개의 워터컷곡선이 그려진다. 주입정에서 가장 가까운 곳에 위치한 생산정 1번에서 가장 먼저 물이 생산되고 가장 멀리 있는 생산정 4번에서 가장 늦게 물이 생산된다.

물 도달시간 차이는 각 생산정에서 물이 최초로 생산된 날의 차이를 의미한다. 따라서 주입정 위치를 최적화하기 위해서는 4개의 물 도달시간 차이를 동시에 줄여야 하는데, 이를 위해서 생산정 1번, 2번 워터컷곡선은 목표워터컷곡선이 있는 오른쪽으로, 생산정 3번, 4번 곡선은 왼쪽으로 이동시켜야 한다.

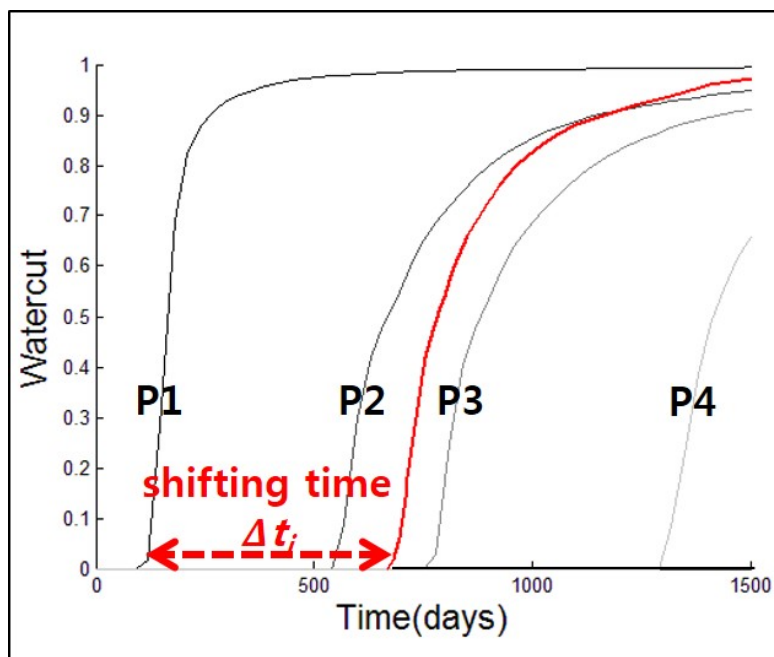


Fig. 3.3 Shifting time ($\Delta t_1 \sim \Delta t_4$) calculations

3단계는 2단계에서 구한 물 도달시간 차이를 이용해 주입정의 좌표를 갱신하는 단계이다. Fig. 3.4는 현재 주입정과 생산정과 직선거리를 보여준다. 2단계에서 구한 물 도달시간 차이를 감안할 때 주입정과 생산정 1번, 2번과의 거리는 늘어나야 하고 생산정 3번, 4번과의 거리는 줄어야 한다. 이를 위해 1단계에서 구한 민감도행렬을 이용하는데 3.2절에 구체적인 과정을 설명하였다. 역산결과 새로운 주입정 위치는 (6,4)에서 (10,9)로 갱신되었다.

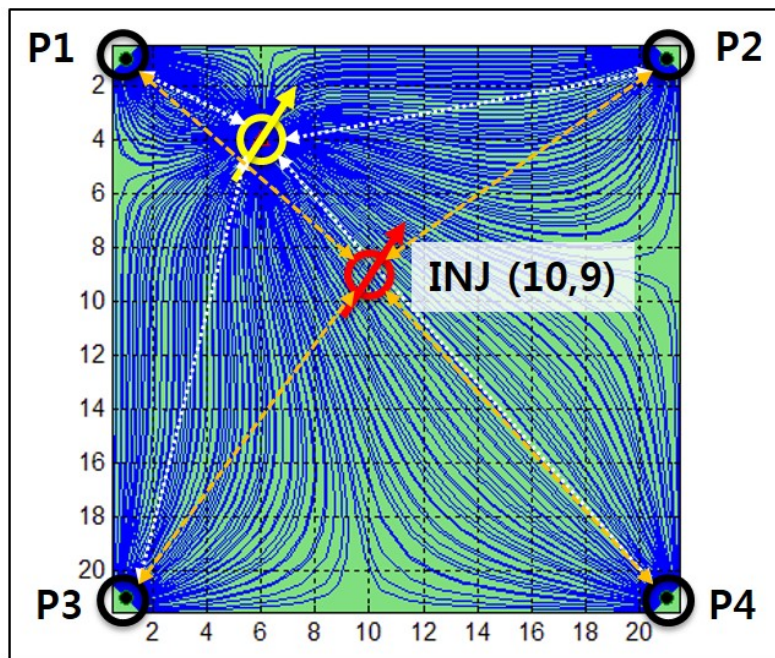


Fig. 3.4 Calculation of the coordinate of an injection well (INJ)

마지막 4단계에서는 주입정 위치의 변화여부를 확인한다(Fig. 3.5). 앞선 과정에서 주입정의 좌표값이 (6,4)에서 (10,9)로 변화했기 때문에 다시 (10,9)를 시작점으로 하여 위의 과정을 반복한다. 참고로 그 결과 주입정의

위치는 필드 정가운데 위치인 (11, 11)에 위치한다. 위치변화 여부를 확인하기 위해 한번 더 과정을 반복하지만 위치갱신이 더 이상 발생하지 않아 (11,11)이 최종 주입정 위치로 결정된다. 또한 이때 4개의 워터컷곡선은 하나의 곡선으로 수렴한다.

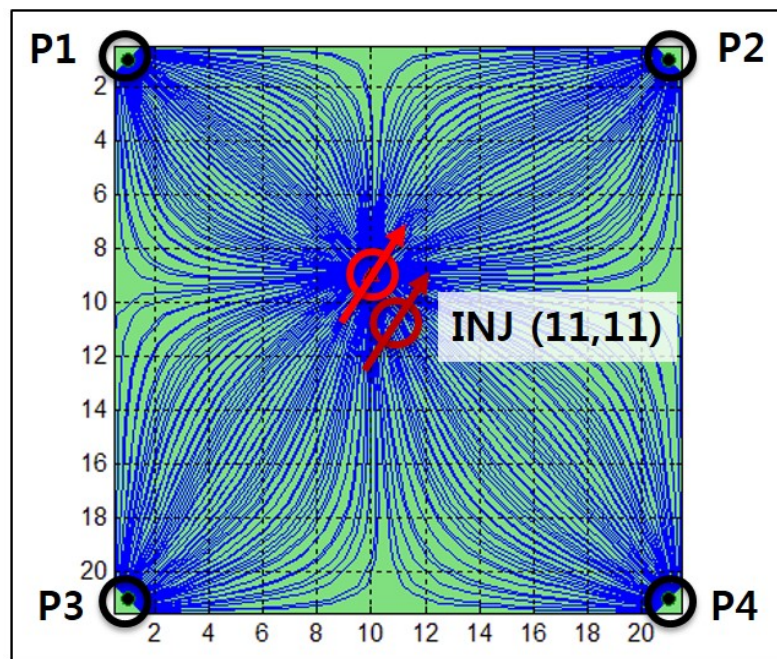


Fig. 3.5 Result of the injection well positioning

3.2 주입정 위치 갱신과정

주입정 위치 갱신과정은 생산일수로 구한 시간차이를 주입정 위치이동으로 계산하는 과정이다. 3.1절에서 주입정의 좌표는 (6,4)에서 시작하여 (10,9)를 거쳐 최종적으로 (11,11)로 이동하였다. 이 과정을 구체적으로 설명하고자 한다. 우선 현재 주입정 좌표를 기준으로 각 생산정에 대한 상대좌표를 계산한다. Table 3.1을 보면 4개의 생산정에 x, y좌표를 입력하였다. 그리고 주입정의 x좌표 6, y좌표 4에 대해 생산정의 좌표와의 차이를 구하였다. 그 결과 생산정 1번부터 4번까지 각각 (-5,-3), (-5,17), (15,-3), (15,17) 인 상대좌표를 얻었다. 이 상대좌표는 생산정까지의 거리 계산과 주입정의 이동방향 계산에 사용된다.

다음은 민감도행렬을 계산한다. 유선시뮬레이터로 구한 각 생산정까지의 TOF 값에서 평균 TOF 값을 빼 물 도달시간 차이를 구하였다. 생산정 1번과 3번의 경우 음수이므로 목표위터컷곡선에 비해 물 생산이 빨랐고 생산정 2번과 4번의 경우 양수이므로 물 생산이 늦었다. 이 값에서 격자길이(grid length), 포화속도(df_w/dS_w), 주입정까지 거리(X_j)를 각각 나누어주면 각 생산정에 대한 민감도를 계산할 수 있다. 격자길이를 나누는 것은 격자단위로 표시하기 위해서이다.

마지막으로 첫 단계에 구한 상대좌표와 두번째 단계에서 구한 민감도를 서로 곱한다. 그 결과 생산정 4개의 x방향 상대좌표는 11.525, -0.641, -1.879, 8.312이다. 이 네 값을 평균하면 4.329이고 격자단위로 표시하기 위해 반올림을 하면 최종 x방향 상대좌표는 4가 된다. 같은 방법으로 y방향 상대좌표는 5로 계산된다. 따라서 주입정은 x방향으로 4만큼, y방향으로 5만큼 이동한 (10,9)가 갱신된 주입정의 좌표가 된다.

Table 3.2는 주입정 (10,9)에서 시작해 위의 과정을 반복한 결과이다. 그 결과 갱신된 좌표는 (11,11)이 된다. Table 3.3은 주입정 (11,11)에서 시작해 다시 위의 과정을 반복한 결과이다. 그 결과 주입정의 위치이동이 발생하지 않았다. 따라서 (11,11)이 최종 주입정 위치가 된다. 실제로 물 도달시간 차이값을 확인하면 -0.304, 0.424, -0.423, 0.303으로 매우 작다. 이미 4개의 워터컷곡선이 거의 일치하고 있는 상태이다.

주입정의 위치갱신은 탐색방향과 탐색크기에 의해 결정된다. 식 (2.8)과 같이 그 과정은 민감도행렬을 통해 이루어진다. 먼저 분자에 위치한 TOF 평균값은 탐색방향을 결정한다. 물 도달시간 차이의 부호와 크기에 의해 주입정의 탐색방향이 결정된다. 분모에 위치한 포화속도는 탐색크기를 좌우한다. 그 값이 클 경우 수렴속도가 느리게 되고 너무 작으면 최소점에 수렴하지 않고 진동한다. 포화속도는 Fig. 2.4와 같이 x축이 S_w 이고 y축이 f_w 인 그래프에서 접선의 기울기 값이므로 0보다 크고 대략 4보다 작은 값을 갖는다. 현재 포화속도의 값은 수렴속도를 높이기 위해 1의 값을 사용하였다.

Table 3.1 Calculation of an injector coordinate during the 1st iteration

Iteration 1	P1	P2	P3	P4	Remark
1) Relative coordinate between Pi and I					
Pi(x-coordinate)	1	1	21	21	
Pi(y-coordinate)	1	21	1	21	
I(x-coordinate)	6	6	6	6	6
I(y-coordinate)	4	4	4	4	4
Δx_i (Pi - I)	-5	-5	15	15	
Δy_i (Pi - I)	-3	17	-3	17	
2) Sensitivity matrix					
ShiftingTime(TOF)	-672.005	113.561	-95.814	628.148	
grid length	50	50	50	50	
dfw / dSw	1	1	1	1	
Xj	5.831	17.720	15.297	22.672	
Sij	-2.305	0.128	-0.125	0.554	
3) Injector coordinate					
$\Delta x_i * S_{ij}$	11.525	-0.641	-1.879	8.312	4.329
$\Delta y_i * S_{ij}$	6.915	2.179	0.376	9.420	4.722
Round($\Delta x_i * S_{ij}$)					4
Round($\Delta y_i * S_{ij}$)					5
I(x-coordinate)_new					10
I(y-coordinate)_new					9

< Explanation of Abbreviations >

- 1) P_i : i-th production well, I: injection well
- 2) X_j : distance from an injection well to a production well, S_{ij} : sensitivity matrix
- 3) Round: round off to the nearest integer

Table 3.2 Calculation of an injector coordinate during the 2nd iteration

Iteration 2	P1	P2	P3	P4	Remark
1) Relative coordinate between Pi and I					
Pi(x-coordinate)	1	1	21	21	
Pi(y-coordinate)	1	21	1	21	
I(x-coordinate)	10	10	10	10	10
I(y-coordinate)	9	9	9	9	9
$\Delta xi (Pi - I)$	-9	-9	11	11	
$\Delta yi (Pi - I)$	-8	12	-8	12	
2) Sensitivity matrix					
ShiftingTime(TOF)	-197.758	68.017	-61.655	184.757	
grid length	50	50	50	50	
dfw / dSw	1	1	1	1	
Xj	12.042	15.000	13.601	16.279	
Sij	-0.328	0.091	-0.091	0.227	
3) Injector coordinate					
$\Delta xi * Sij$	2.956	-0.816	-0.997	2.497	0.910
$\Delta yi * Sij$	2.628	1.088	0.725	2.724	1.791
Round($\Delta xi * Sij$)					1
Round($\Delta yi * Sij$)					2
I(x-coordinate)_new					11
I(y-coordinate)_new					11

Table 3.3 Calculation of an injector coordinate the during the 3rd iteration

Iteration 3	P1	P2	P3	P4	Remark
1) Relative coordinate between Pi and I					
Pi(x-coordinate)	1	1	21	21	
Pi(y-coordinate)	1	21	1	21	
I(x-coordinate)	11	11	11	11	11
I(y-coordinate)	11	11	11	11	11
Δxi (Pi - I)	-10	-10	10	10	
Δyi (Pi - I)	-10	10	-10	10	
2) Sensitivity matrix					
ShiftingTime(TOF)	-0.304	0.424	-0.423	0.303	
grid length	50	50	50	50	
dfw / dSw	1	1	1	1	
Xj	14.142	14.142	14.142	14.142	
Sij	0.000	0.001	-0.001	0.000	
3) Injector coordinate					
$\Delta xi * Sij$	0.004	-0.006	-0.006	0.004	-0.001
$\Delta yi * Sij$	0.004	0.006	0.006	0.004	0.005
Round($\Delta xi * Sij$)					0
Round($\Delta yi * Sij$)					0
I(x-coordinate)_new					11
I(y-coordinate)_new					11

4. 연구결과

4.1 참조필드

개발한 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해 2차원 가상저류층을 생성하였다. 가상 저류층은 가로 1,050 ft, 세로 1,050 ft, 높이 20 ft의 2차원 정방형이며, 가로 21개, 세로 21개의 격자로 총 441개의 격자를 가진다. 격자별 공극률, 초기압력을 비롯한 가상저류층 물성을 표로 정리하면 Table 4.1과 같다. 저류층에 존재하는 유체는 원유와 물의 2상으로 구성된다. 두 유체에 사용된 물성은 Table 4.2와 같다.

유체투과율의 공간적 분포양상은 Fig. 4.1에서 보이는 바와 같이, 높은 유체투과율이 필드의 우측 상단에서부터 하단부 방향으로 길게 분포한다. 반면 필드의 좌측지역은 상대적으로 낮은 유체투과율을 갖는다. 이처럼 공간적으로 불균질한 유체투과율 분포는 Fig. 4.2와 같은 참조필드의 유선분포에서도 확인할 수 있다. 참조필드 우측의 높은 유체투과율 영역에서는 유선의 밀도가 높으며, 필드 좌측의 낮은 유체투과율 영역에서는 유선의 밀도가 상대적으로 낮다. 두 유체의 물 포화도에 따른 상대유체투과율 곡선은 Fig. 4.3과 같다.

가상저류층은 총 4개의 생산정과 1개의 주입정이 존재하는 역5점(inverted five-spot pattern) 수공법으로 오일을 생산한다. Fig. 4.5와 같이 4개의 생산정은 정사격형필드의 각 모서리에 존재하고 P1~P4로 표시하였다. 이 유정들에 대한 정보는 Table 4.4에 정리하였다. 각 생산정은 100 STB/day의 일정유량 생산조건에서 생산하며, 주입정에서는 300 STB/day의 일정유량으로 물이 주입된다. 생산기간은 총 1,500일로 생산기간 동안 30일 간격으로

결과값을 확인하였다. 또한 참조필드를 생성하면서 사용한 가정은 아래와 같다.

- x방향 유체투과율과 y방향 유체투과율은 동일함.
- 공극률은 모두 동일함.
- 오일과 물만 존재하는 2상유동임.
- 생산정은 워터컷에 상관없이 주어진 기간동안 생산을 지속함.

Table 4.1 Grid properties of the reference field

Parameters	Value
Number of grid cells (441)	$21 \times 21 \times 1$
Width of the reservoir, ft	1,050
Length of the reservoir, ft	1,050
Thickness of the reservoir, ft	20
Grid width, ft	50
Grid length, ft	50
Porosity, fraction	0.15
Initial reservoir pressure, psia	2,000

Table 4.2 Fluid properties of the reference field

Parameters	Value
Connate water saturation, fraction	0.25
Residual oil saturation, fraction	0.2
End-point relative water permeability, fraction	0.3
End-point relative oil permeability, fraction	0.7
Formation volume factor of water, rb/stb	1
Water compressibility at 2,000 psia, 1/psi	5.00E-7
Water viscosity, cp	1
Oil viscosity, cp	2

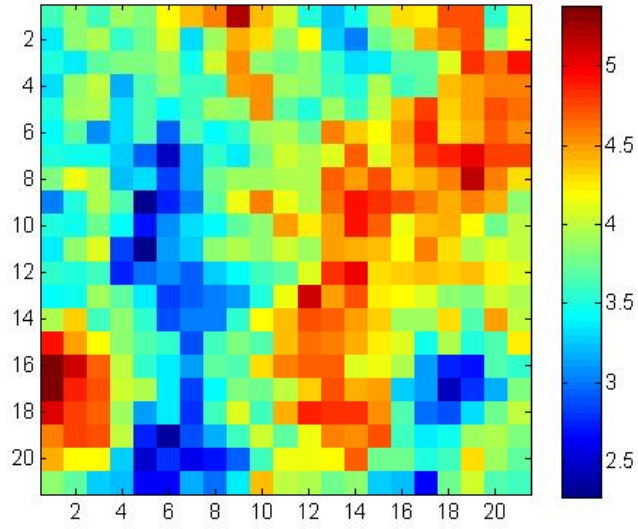


Fig. 4.1 Log permeability distribution of the reference field

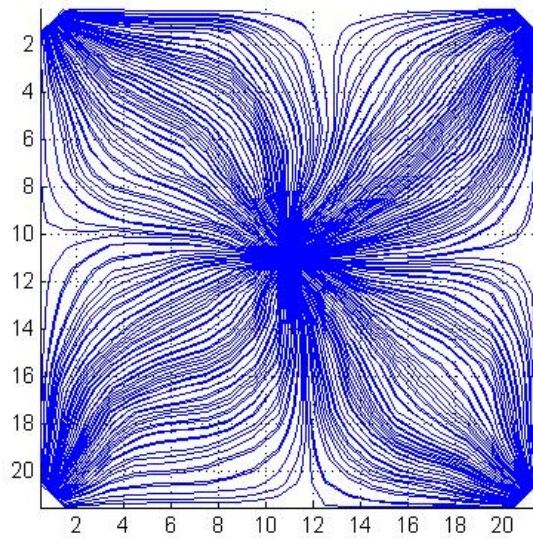


Fig. 4.2 Generated streamline distribution of the reference field

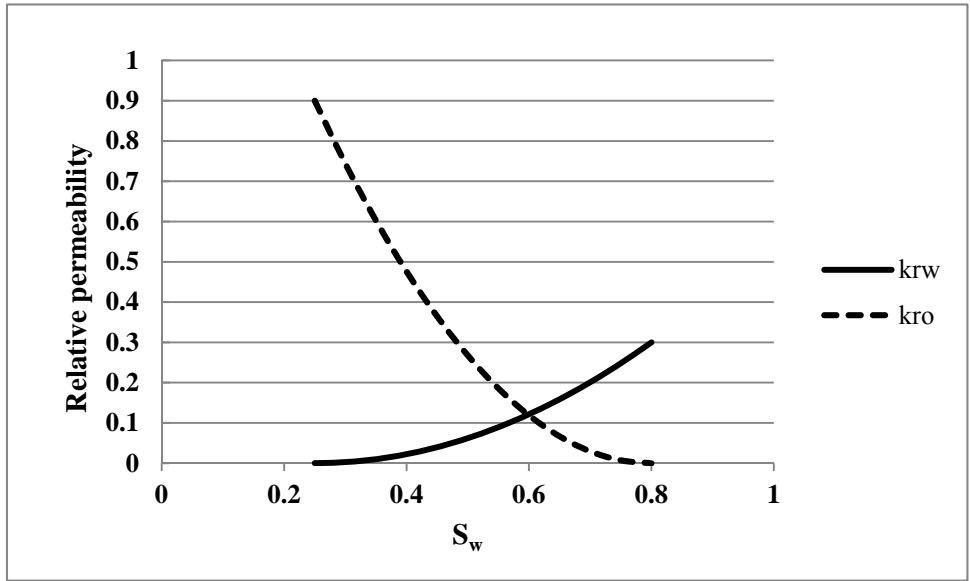


Fig. 4.3 Relative permeability curves

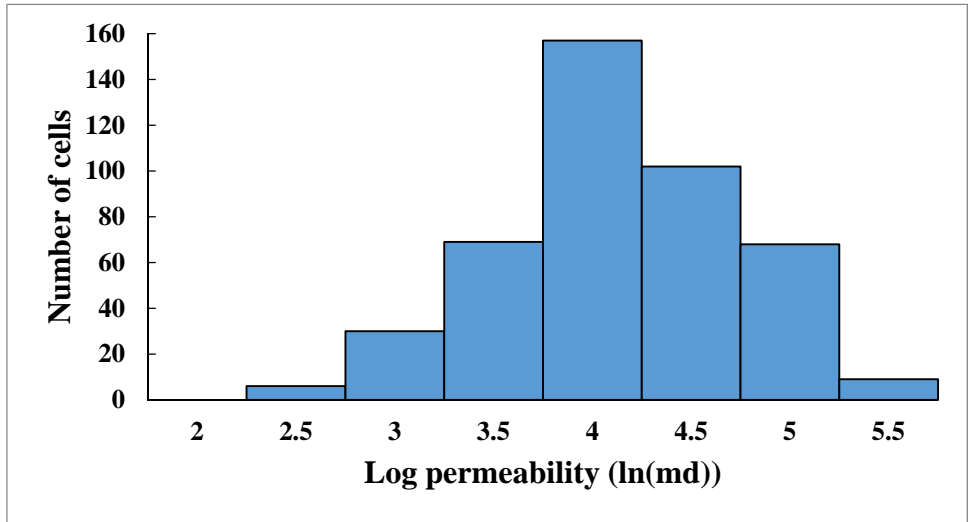


Fig. 4.4 Histogram of log permeability

Table 4.3 Geostatistical data

Parameters	Value
Average log permeability, ln(md)	3.83
Standard deviation of log permeability, ln(md)	0.40
Variogram model	Spherical
Sill	0.5
Nugget	0
Range, ft	500

Table 4.4 Production well data

Well name	Well coordinate	Log permeability, ln(md)	Boundary condition
P1	(1,1)	3.60	100 bbl/day, constant liquid production rate
P2	(21,1)	4.15	
P3	(1,21)	3.86	300 bbl/day, constant water injection rate
P4	(21,21)	3.63	

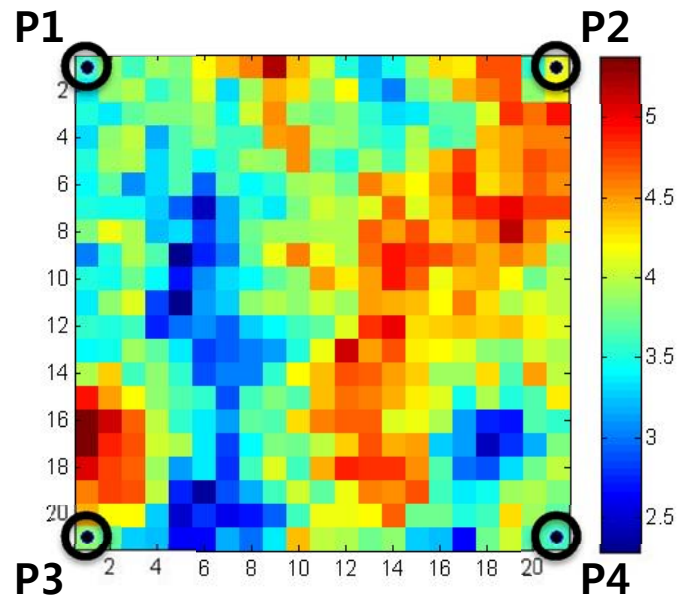


Fig. 4.5 Position of four production wells

4.2 제안한 방법의 타당성 검증

성공적인 유정위치 최적화를 위해서 주어진 유전조건에서 주입정의 초기위치에 상관없이 안정적인 결과를 얻어야 한다. 수반행렬방법의 경우 초기위치 선정에 매우 민감하여 지역적으로 수렴하는 최소값 문제를 해결하기 어렵다. 제안한 방법을 이용해 4.1절의 가상저류층을 대상으로 주입정의 위치가 일정하게 수렴하는지 확인하였다.

Fig. 4.6과 같이 생산정 3번 근처에 위치한 (3,19)을 시작점으로 설정한 후 위치 최적화를 수행하였다. 그 결과 주입정의 위치는 (9,14)을 거쳐 (9,11)로 이동하였고 더 이상의 위치변화가 없어 이 지점이 주입정 위치로 결정되었다. 또한 Fig. 4.7에서 반복연산을 거치면서 각 생산정의 워터컷곡선이 점차 빨간색의 목표워터컷곡선 주위로 모아진다. 각 생산정에서의 물 생산시기가 점차 일치하는 방향으로 주입정의 위치가 이동하는 것을 확인할 수 있다.

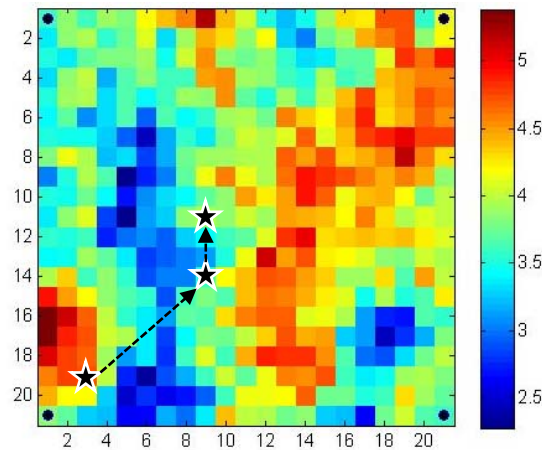
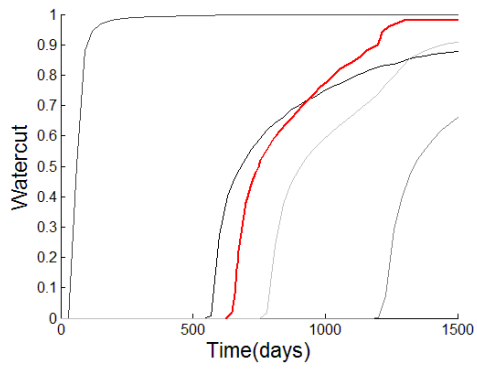
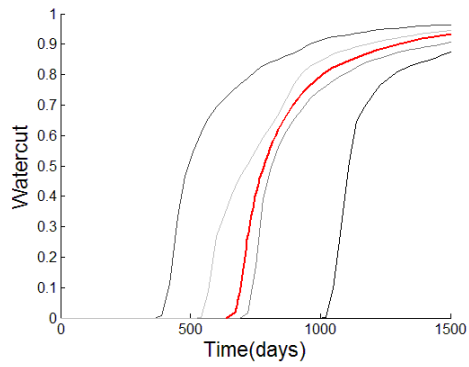


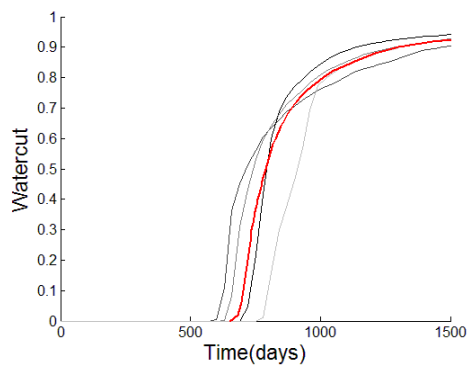
Fig. 4.6 Movement of an injection well from (3,19) during iterations



(a) Injection well at (3,19)



(b) Injection well at (9,14)



(c) Injection well at (9,11)

Fig. 4.7 Results of an optimal shifting time from initial location (3,19)

시작점의 위치를 변경할 경우에도 주입정의 위치가 일정하게 수렴하는지 확인하기 위해 각각 생산정 1, 2, 4번 근처에 위치한 (3,3), (19,3), (19,19)에 대해서 제안한 방법을 적용하였다. 그 결과 모두 (9,11)로 수렴하였다(Fig. 4.8). Fig. 4.9부터 Fig. 4.11를 통해 세 시작점 역시 각 생산정에서의 물 생산시기가 점차 일치하는 방향으로 주입정의 위치가 이동하는 것을 확인할 수 있다.

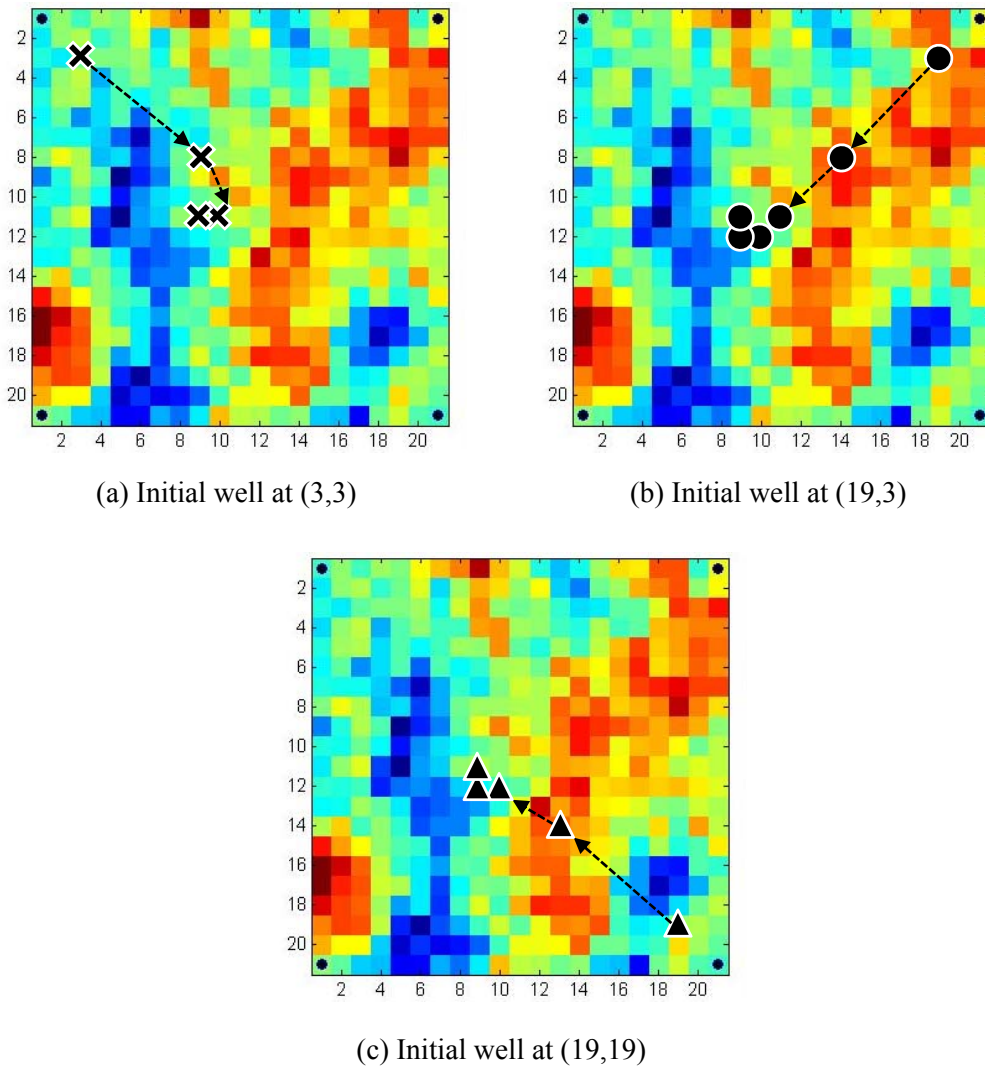
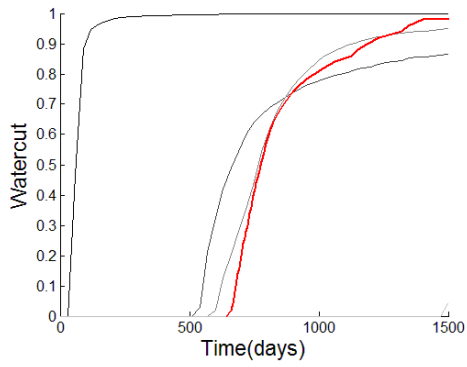
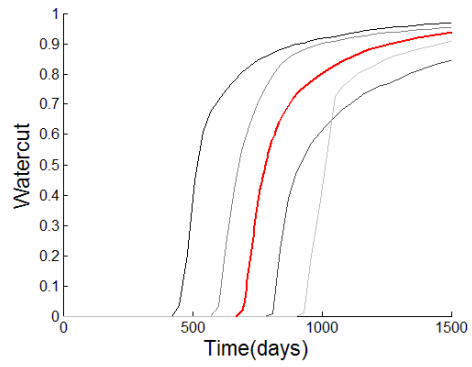


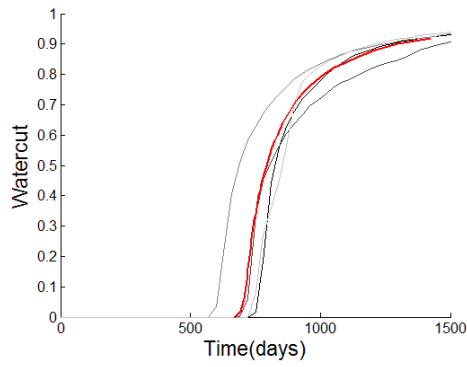
Fig. 4.8 Movement of an injection well during iterations



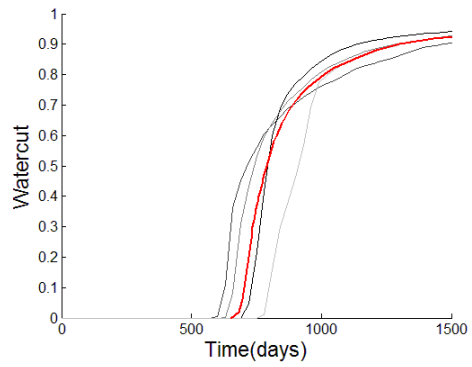
(a) Injection well at (3,3)



(b) Injection well at (9,8)

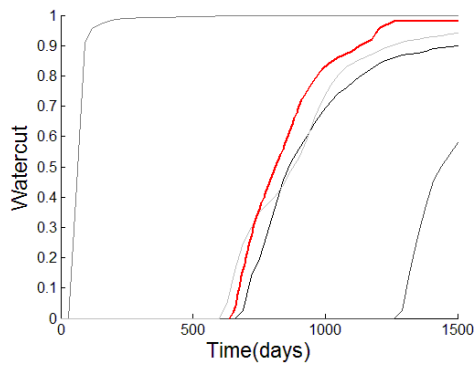


(c) Injection well at (10,11)

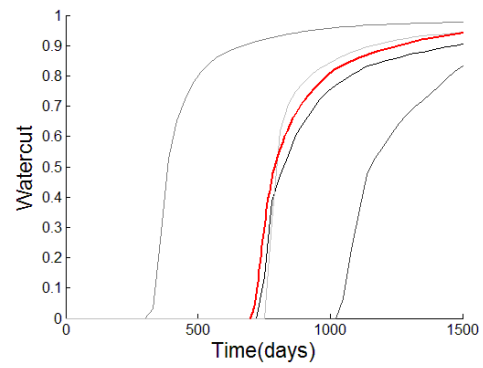


(d) Injection well at (9,11)

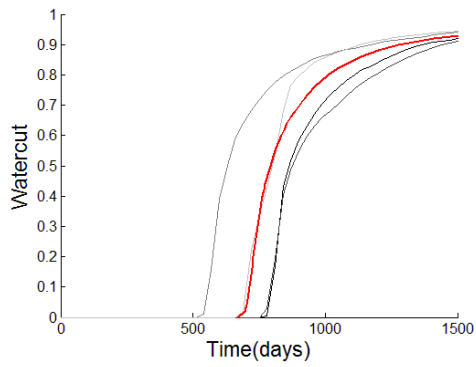
Fig. 4.9 Results of an optimal shifting time from initial location (3,3)



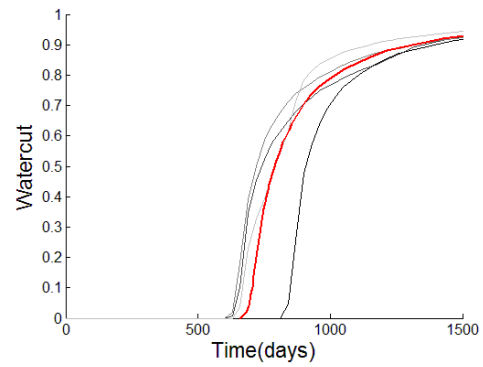
(a) Injection well at (19,3)



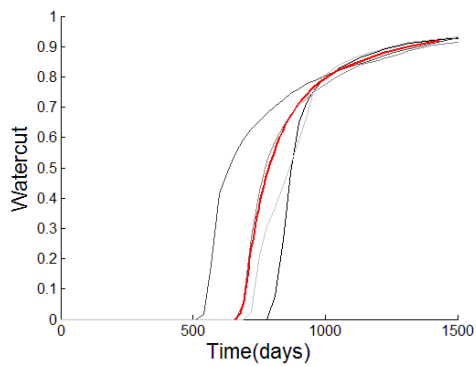
(b) Injection well at (14,8)



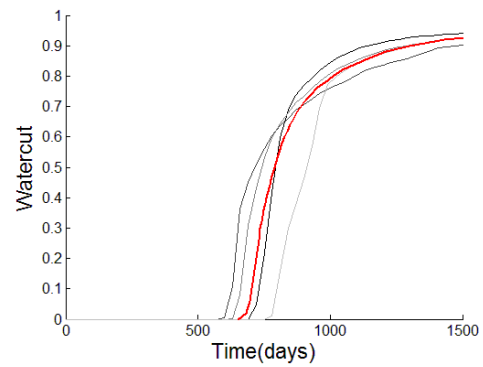
(c) Injection well at (11,11)



(d) Injection well at (10,12)

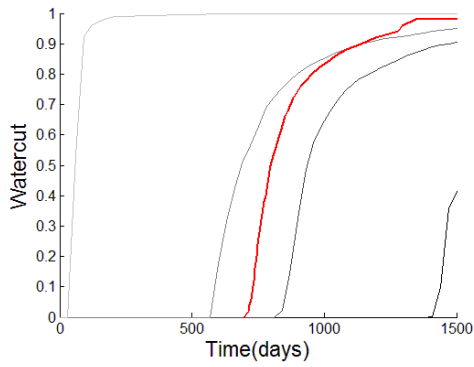


(e) Injection well at (9,12)

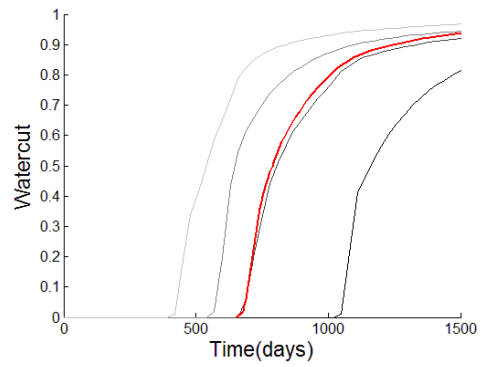


(f) Injection well at (9,11)

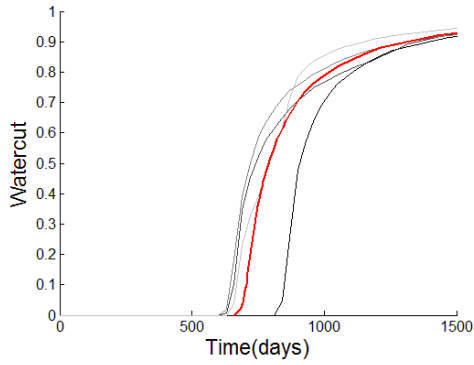
Fig. 4.10 Results of an optimal shifting time from initial location (19,3)



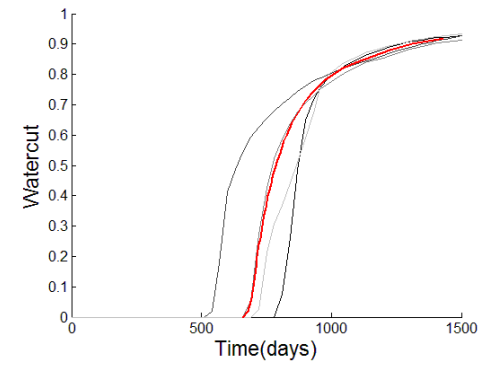
(a) Injection well at (19,19)



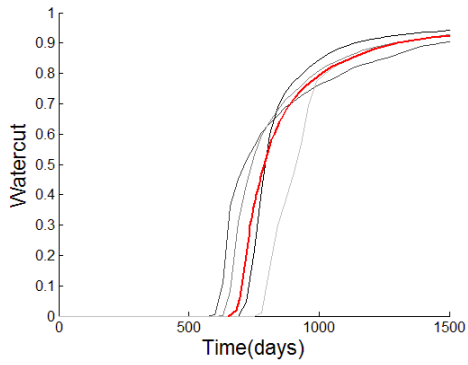
(b) Injection well at (13,14)



(c) Injection well at (10,12)



(d) Injection well at (9,12)



(e) Injection well at (9,11)

Fig. 4.11 Results of an optimal shifting time from initial location (19,19)

반복연산에 따라 물 도달시간의 불일치 정도가 줄어드는지 확인하였다. 이를 위해 4개의 물 도달시간 차이의 분산 즉, 유정별 TOF의 분산값을 사용하였다. Fig. 4.12는 x축은 반복횟수, y축은 유정별 TOF의 분산값으로 나타낸 그래프이다. 반복을 거치면서 유정별 TOF의 분산값이 감소하였다. 특히 처음 2~3회 반복계산에서 그 값이 급격히 감소하는데 이때 최종 계산된 주입정의 근처까지 이동하였다.

서론에서 언급한 바와 같이 비변화율기반 최적화기법인 경우 저류층의 크기가 커질 경우 탐색해야 하는 면적이 넓어지므로 반복연산 횟수가 크게 증가한다. 수반행렬방법 경우에도 주입정이 1칸씩 이동하여 이동거리와 방향전환 횟수가 늘어나므로 반복연산 횟수가 증가한다. 이에 비해 제안한 방법은 초기에 최종 주입정의 방향으로 주입정을 큰 폭으로 이동시키므로 반복연산 횟수가 적다. 시작점 위치에 따라 총 반복연산 횟수는 3~6회로 매우 빠르다.

다음은 계산된 주입정 위치 (9,11)에서 얼마나 높은 누적오일생산량을 나타내는지 확인하였다. 이를 위해 유정별 TOF의 분산값과 누적오일생산량을 비교하였다. Fig. 4.13 (a)는 유정별 TOF의 분산값을 격자별로 나타낸 것이고 (b)는 누적오일생산량을 격자별로 나타낸 것이다. 제안한 방법으로 유정별 TOF의 최저점인 (9,11)을 찾았고 이는 누적오일생산량 중 전체에서 2번째로 높은 값을 나타내었다. 가장 높은 생산량은 바로 옆 격자인 (10,11)이었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 두 값의 분포형태는 유사해 물 도달시간 일치와 누적오일생산량간에 매우 높은 상관관계가 있음을 확인하였다.

두 변수의 상관관계를 정량적으로 확인하기 위해 회귀식의 적합도를 측정하는 결정계수 값을 확인하였다. 이를 위해 x축은 누적오일생산량인

FOPT(field oil production total), y축은 유정별 TOF의 분산값으로 하여 선형회귀식으로 결정계수의 값을 계산하였다. 그 결과 참조필드에서 결정계수는 0.884로 매우 높은 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 4.14).

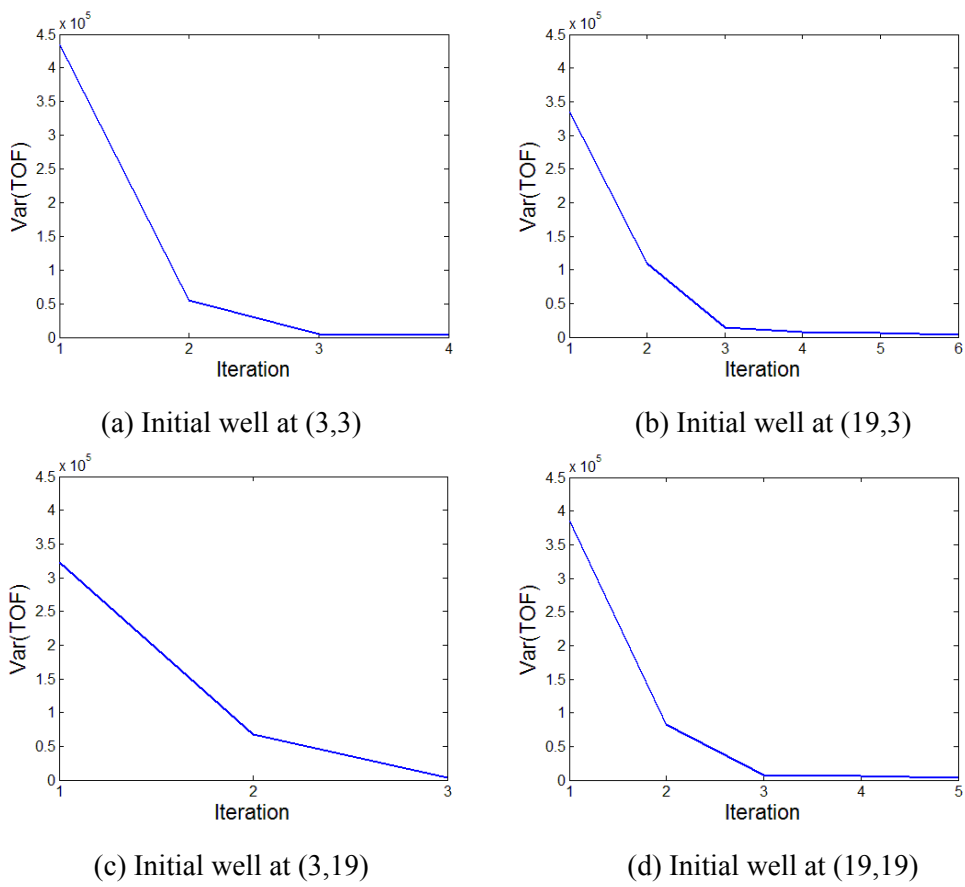


Fig. 4.12 Change of variation of TOF during iterations

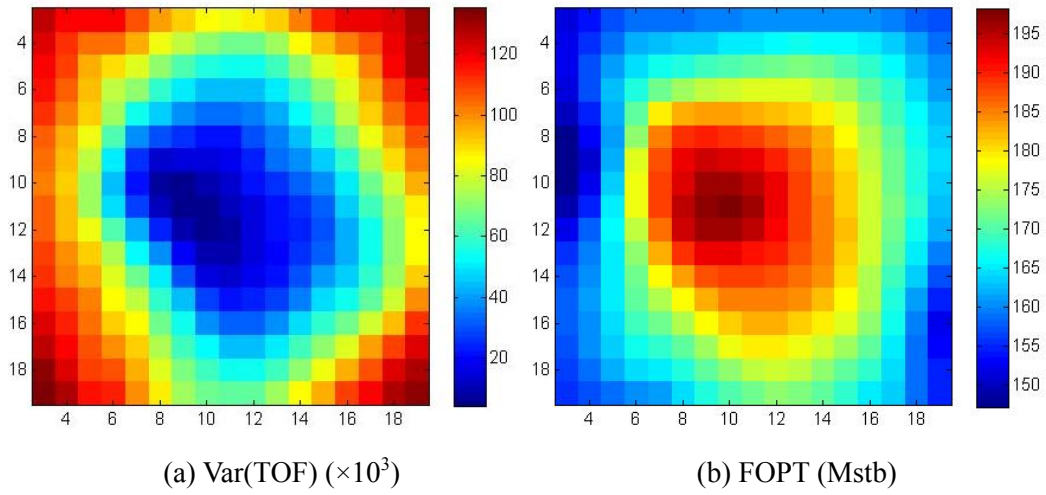


Fig. 4.13 Distributions of both var(TOF) and FOPT values

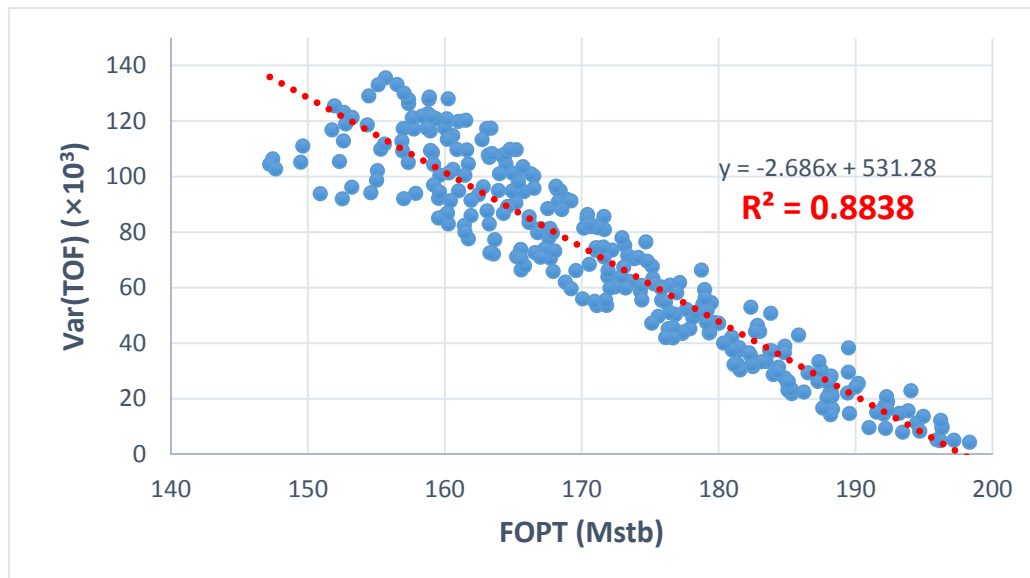


Fig. 4.14 Correlation between var(TOF) and FOPT

4.3 다른 유체투과율 필드에의 적용

제안한 알고리즘으로 다양한 유체투과율 분포를 가지는 필드에 대해서 주입정 위치 최적화를 시행하였다. 유체투과율 분포를 제외한 조건은 모두 참조필드와 동일하게 가정하였다. 생성된 두 필드는 모두 로그유체투과율 분포가 정규분포를 따른다. 하지만 각자 상이한 공간분포를 가지며 분포 특징은 Fig. 4.15와 같다.

먼저 반복연산에 따라 물 도달시간의 불일치 정도가 줄어드는지 확인하였다. 그 결과 주입정의 위치가 갱신을 거치면서 유정별 TOF의 분산값은 급격히 감소하였고 평균 연산횟수는 각각 4회(4, 4, 4, 4회)와 3.75회(4, 3, 4, 4회)였다(Fig. 4.17, Fig. 4.21). 4.2절 참조필드의 평균 4.5회와 합쳐 평균을 계산할 경우 임의의 시작점에서 약 4회의 반복연산을 통해 주입정의 위치를 찾았다.

시작점의 위치를 변경할 경우에도 주입정이 일정한 위치로 수렴하는지 확인하기 위해 각각의 생산정 근처에 위치한 (3,3), (19,3), (3,19), (19,19)에 대해서 제안한 방법을 적용하였다. 그 결과 시작점에 상관없이 각각 (14,10)과 (12,10)에 안정적으로 수렴하였다(Fig. 4.18, Fig. 4.22).

다음은 계산된 주입정 위치에서 얼마나 높은 누적오일생산량을 나타내는지 확인하였다. 유정별 TOF의 분산값과 누적오일생산량을 비교하였다. Case 1의 경우 Fig. 4.19에서 유정별 TOF의 최저점인 (14,10)을 찾았고 이는 누적오일생산량 중 전체에서 2번째로 높은 값이다. 가장 높은 생산량은 격자는 대각선에 있는 (13,9)이었다. Case 2의 경우 Fig. 4.23에서 유정별 TOF의 최저점인 (12,10)을 찾았고 이는 누적오일생산량에서 가장 높은 값이었다.

두 변수의 상관관계를 정량적으로 확인하기 위해 회귀식의 적합도를 측정하는 결정계수 값을 확인하였다. 그 결과 Case 1의 경우 결정계수는 0.833이었으며 Case 2의 경우 결정계수는 0.926로 역시 매우 높은 상관관계가 있음을 나타내었다(Fig. 4.20, Fig. 4.24).

지금까지 총 3개의 참조필드에 대해 제안한 방법을 적용한 결과 모두 상위 1% 이내의 누적오일생산량을 갖는 주입정의 위치를 찾았다. 하지만 생성한 참조필드 조건에 따라 상위 1% 보다 조금 낮은 오일생산량을 나타낸 경우도 있었다. 따라서 제안한 방법은 최대 3% 이내 결과를 예측한다고 볼 수 있다.

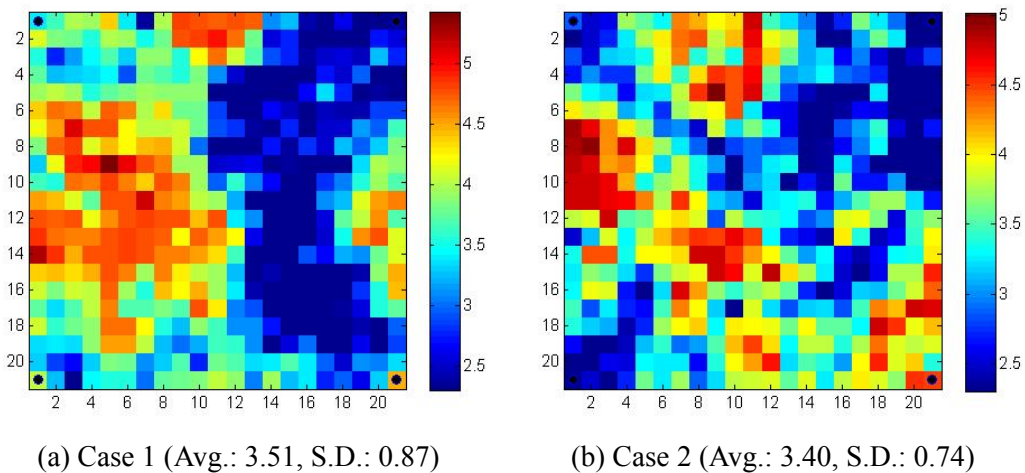
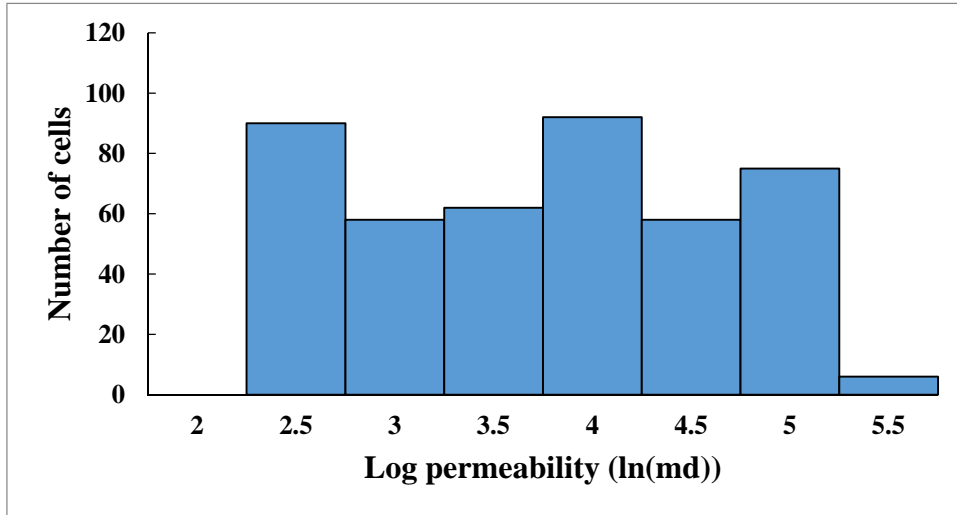
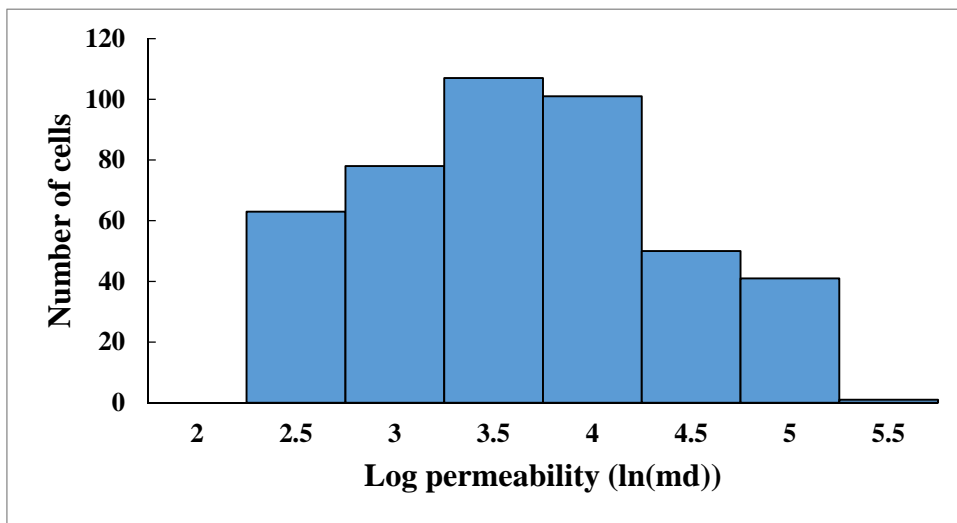


Fig. 4.15 Log permeability distribution of the various reference fields

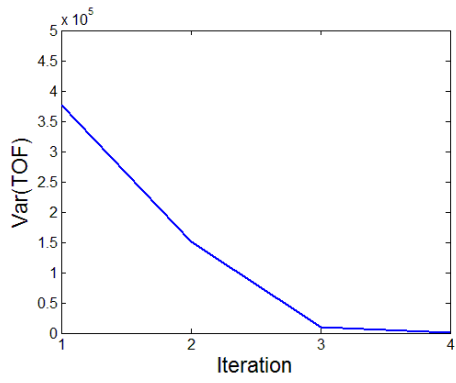


(a) Case 1

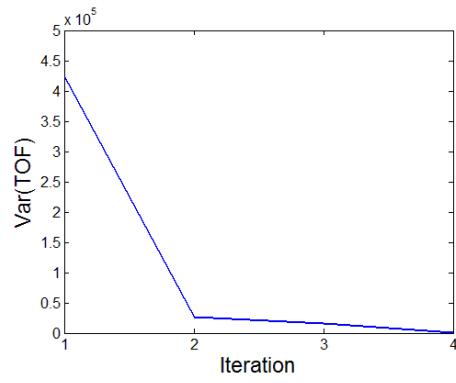


(b) Case 2

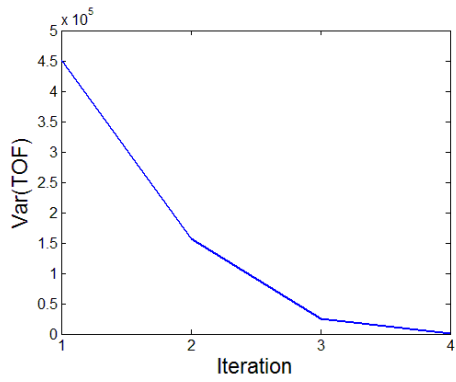
Fig. 4.16 Histogram of log permeability



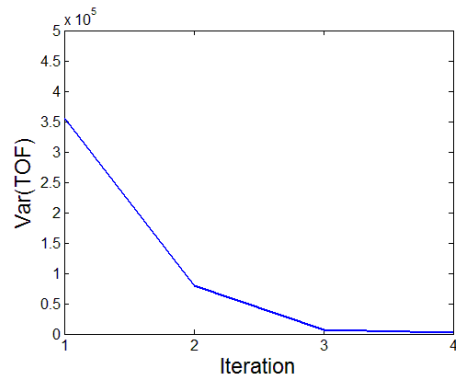
(a) Initial well at (3,3)



(b) Initial well at (19,3)



(c) Initial well at (3,19)



(d) Initial well at (19,19)

Fig. 4.17 Change of var(TOF) during iterations for case 1

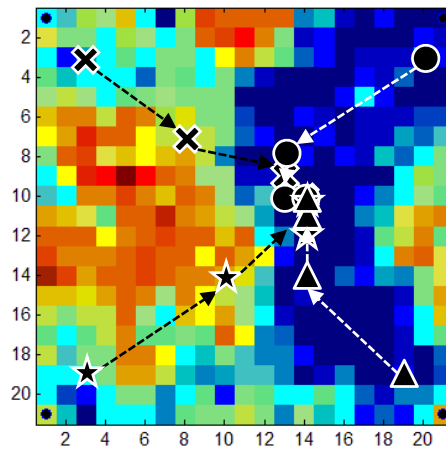


Fig. 4.18 Movements of an injection well during iterations for case 1

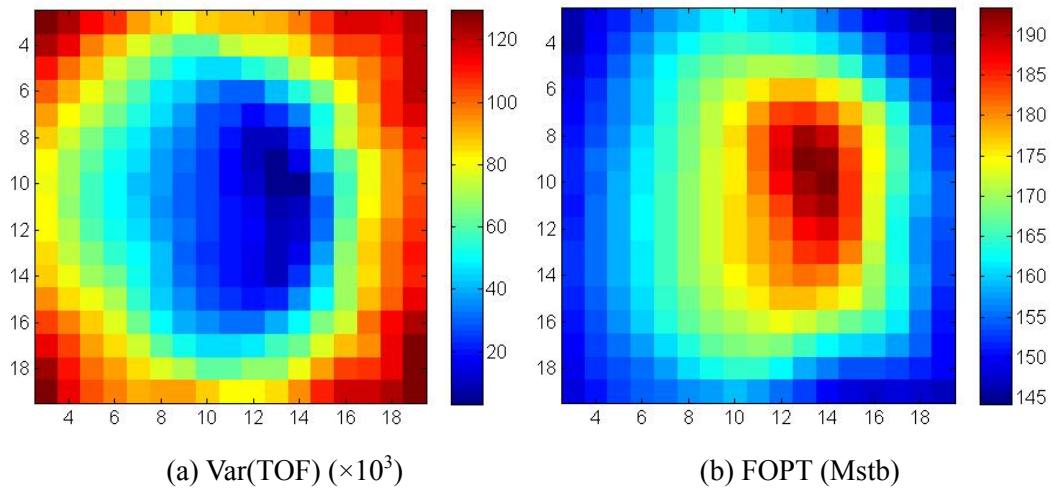


Fig. 4.19 Distributions of both var(TOF) and FOPT values for case 1

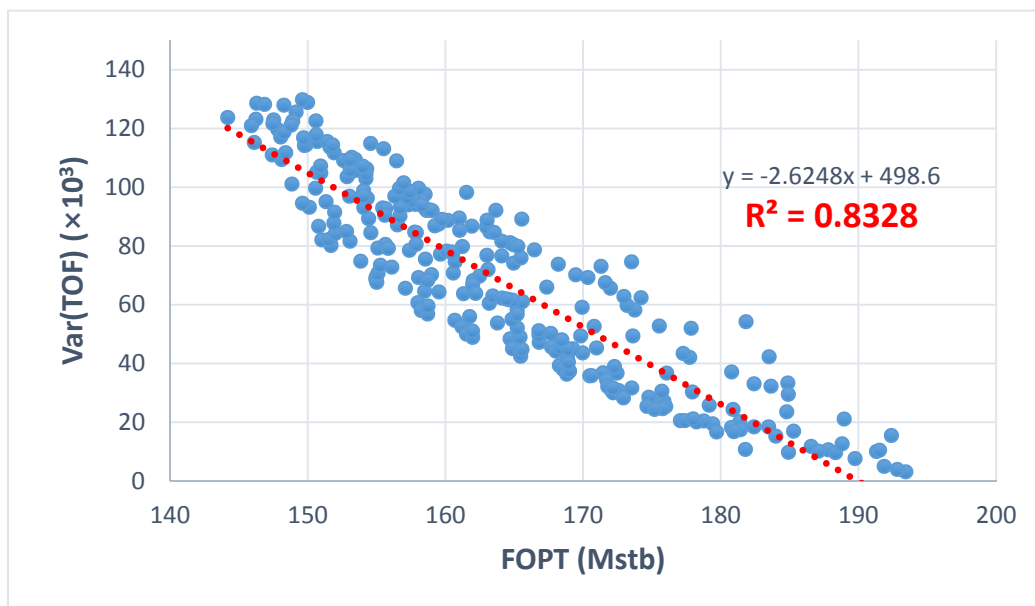
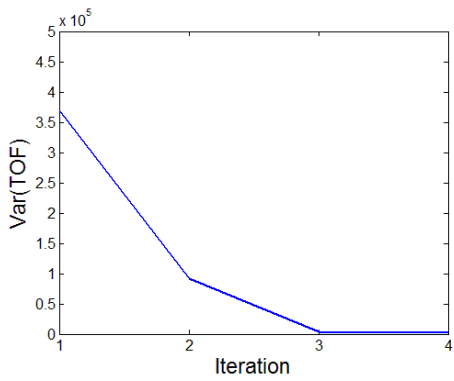
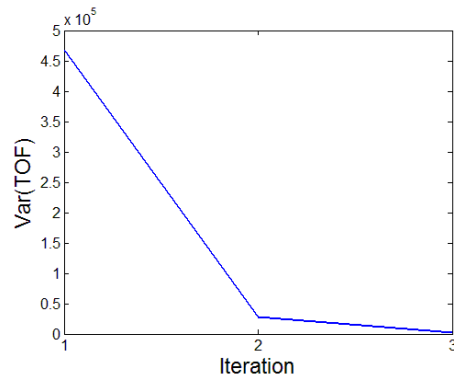


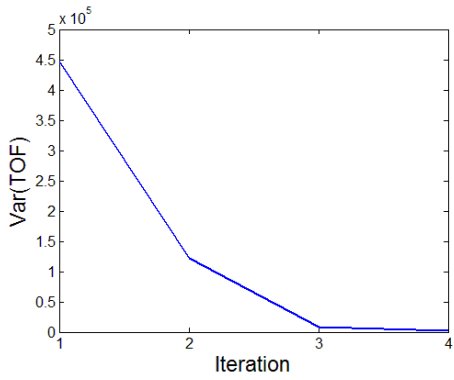
Fig. 4.20 Correlation between var(TOF) and FOPT for case 1



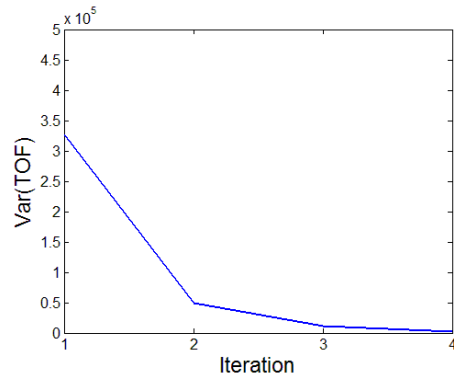
(a) Initial well at (3,3)



(b) Initial well at (19,3)



(c) Initial well at (3,19)



(d) Initial well at (19,19)

Fig. 4.21 Change of var(TOF) during iterations for case 2

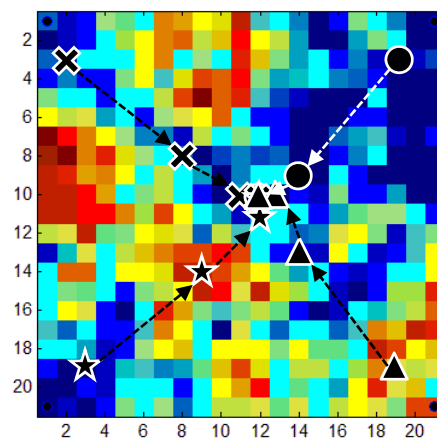


Fig. 4.22 Movements of an injection well during iterations for case 2

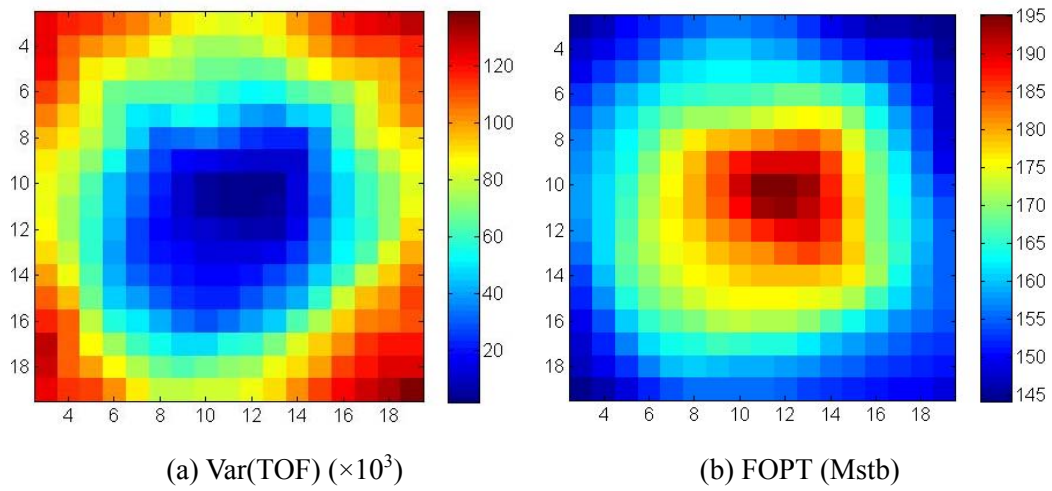


Fig. 4.23 Distributions of both var(TOF) and FOPT values for case 2

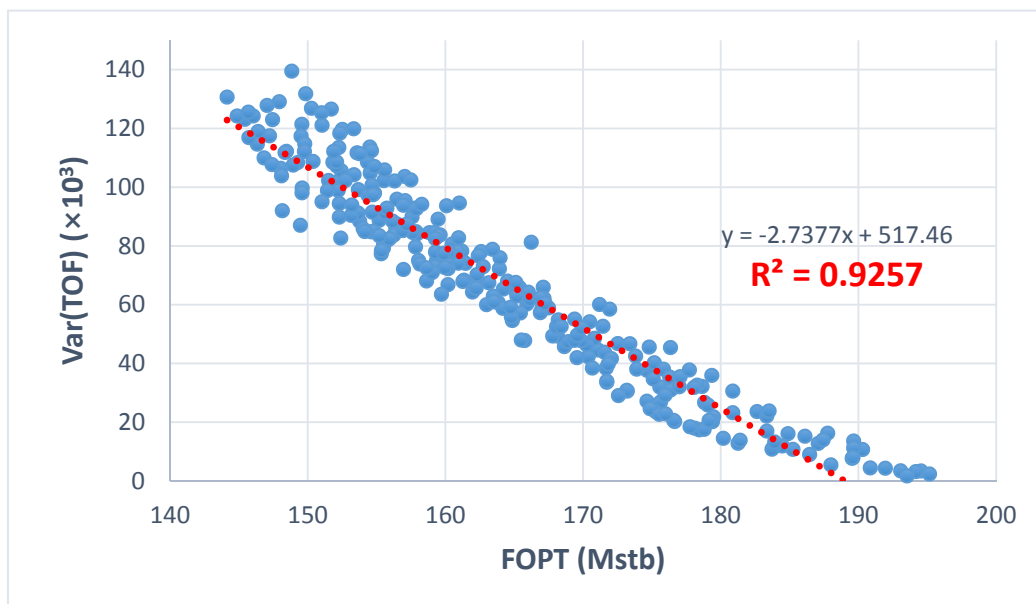


Fig. 4.24 Correlation between var(TOF) and FOPT for case 2

5. 결 론

제안한 주입정 위치 최적화기법은 각 생산정까지의 물 도달시간을 일치시켜 오일생산량을 높이는 새로운 방법이다. 이 기법은 기존 방법이 갖는 과도한 계산시간 한계를 극복하고 신뢰할 수 있는 결과를 나타내었다. 연구결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 계산된 주입정 위치에서 수공법을 실시할 경우 상위 3% 이내에 해당하는 누적오일생산량을 구할 수 있다. 필드의 유체투과율분포에 따라 유정별 TOF의 분산값과 누적오일생산량간의 결정계수는 0.8에서 0.9 사이로 매우 높은 상관관계를 나타낸다. 따라서 제안한 방법을 통해 누적오일생산량이 높은 주입정의 위치를 결정할 수 있다.

2. 제안한 방법은 필드 내 초기위치에 상관없이 안정적으로 수렴하는 주입정의 위치를 결정할 수 있다. 연구결과에서 수행한 생산정 근처지역 뿐만 아니라 필드 내 어느 위치를 시작점으로 정해도 모두 한 점으로 수렴하였다. 따라서 시작점 선정을 위한 별도의 과정이 필요하지 않다.

3. 제안한 방법을 이용하면 약 3~6회의 반복계산을 통해 주입정 위치를 찾을 수 있다. 불규칙한 유체투과율 분포를 가지는 여러 참조필드에서 시행했을 때, 처음 2~3회 계산만으로 빠르게 최적점 근처 위치로 주입정 위치가 이동하였다. 따라서 신속하게 주입정 위치를 결정할 수 있다.

본 연구에서 개발한 유선시뮬레이션을 이용한 주입정 위치 최적화방법은 역5점 수공법 이용시 신뢰할 수 있는 주입정 위치를 신속하게 찾게 한다. 이를 통해 유전개발 계획시 수립시간을 크게 단축시킬 것으로 기대된다.

참고문헌

최종근, 2013, 지구통계학, 시그마프레스, 2판, 서울.

Alhuthali, A.H., Oyerinde, A., and Datta-Gupta, A., 2007, "Optimal Waterflood Management Using Rate Control," SPE Reservoir Engineering **10** (5), p. 539-551.

Batycky, R.P., Blunt, M.J., and Thiele, M. R., 1997, "A 3D Field-scale Streamline-Based Reservoir Simulation," SPE Reservoir Engineering **12** (4), p. 246-254.

Bittencourt, A.C. and Horne, R.N., 1997, "Reservoir Development and Design Optimization," SPE 38895, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, Oct. 5-8.

Centilmen, A., Ertekin, T., and Grader, A.S., 1999, "Applications of Neural Networks in Multiwell Field Development," SPE 56433, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, Oct. 3-6.

Datta-Gupta, A., 2000, "Streamline Simulation: A Technology Update," Journal of Petroleum Technology **52** (12), p. 68-73.

Emerick, A.A., Silva, E., Messer, B., Almeida, L.F., Szwarcman, D., Pacheco, M.A.C., and Vellasco, M.M.B.R., 2009, "Well Placement Optimization Using a Genetic Algorithm with Nonlinear Constraints," SPE 118808, SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, Feb. 2-4.

Güyağüler, B., Horne, R.N., Rogers, L., and Rosenzweig, J.J., 2002, "Optimization of Well Placement in a Gulf of Mexico Waterflooding Project," SPE 78266, SPE Reservoir Evaluation & Engineering **5** (3), p. 229-236.

Handels, M., Zandvliet, M., Brouwer, R., and Jansen, J.D., 2007, "Adjoint-based Well Placement Optimization Under Production Constraints," SPE 105797, SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, Feb. 26-28.

He, Z., Yoon, S., and Datta-Gupta, A., 2002, "Streamline-based Production Data Integration With Gravity and Changing Field Conditions," SPE Journal 7 (4), p. 423-436.

Jin, J., 2011, "Oil Production Analysis in Oil Sands Reservoirs Using Distance Based Clustering," MS Thesis, Seoul National University, South Korea.

Min, B., 2007, "Well Placement Optimization Using Artificial Neural Network," MS Thesis, Seoul National University, South Korea.

Møyner, O., Krogstad, S., and Lie, K.A., 2014, "The Application of Flow Diagnostics for Reservoir Management," SPE Journal, DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/171557-PA>.

Park, J., 2014, "Uncertainty Quantification of Reservoir Performances Using Streamline Based Inversion and Distance Based Method," MS Thesis, Seoul National University, South Korea.

Zitha, P., Felder, R., Zornes, D., Brown, K., and Mohanty, K., 2011, "Increasing Hydrocarbon Recovery Factors," SPE Technology Updates, Available from: <http://www.spe.org/tech/2011/07/increasing-hydrocarbon-recovery-factors/>, Accessed on Jan. 12, 2015.

ABSTRACT

Optimization of an Injection Well Using Streamline Simulation

Minchul Kang

Department of Energy System Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The amount of oil resources produced by the primary production is very limited. For oil reservoirs, waterflooding, artificially injecting water into the reservoir, can be used in order to enhance the oil recovery. Therefore, we must find the location of an injection well that improves oil productions by maximizing sweep efficiency.

In this research, water arrival times from an injection well to a production well are equalized to maximize the efficiency of waterflooding. The water arrival times are calculated by streamline simulation and the location of an injection well is updated using the change of water arrival time for the distance to producers as a sensitivity. The location of an optimal injection well is determined when there is no change in the position of an injection well.

By using the proposed method, the location of an optimal injection well is obtained giving within top 3% of cumulative oil productions. The location of an optimal injection well converges stably to one location regardless of initial points from 3 to 6 iterations. Therefore, it is expected that the proposed method can provide reliable position of an optimal injection well efficiently.

Keywords: optimization of an injection well, sweep efficiency, equalizing water arrival time, TOF(time of flight)

Student number: 2013-21004