

수공법 주입량 최적설계를 위한 Well Allocation Factor 적용 연구

윤수진 · 강판상 · 임종세[†]

한국해양대학교 에너지자원공학과

(2015년 10월 28일 접수, 2015년 12월 8일 수정, 2015년 12월 10일 채택)

Application of Well Allocation Factor for Injection Optimization of Waterflooding

Su-Jin Yoon, Pan-Sang Kang, Jong-Se Lim[†]

Department of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University

(Received 28 October 2015, Revised 8 December 2015, Accepted 10 December 2015)

요 약

석유생산을 증진시키기 위해 널리 사용되는 대표적인 방법 중 하나인 수공법을 성공적으로 수행하기 위해서는 적절한 물주입량을 정하는 것이 중요하다. 일반적으로 수공법의 주입유량을 할당하기 위하여 생산정과 주입정 사이 관계를 정량화하는 well allocation factor(WAF)를 이용한다. 수공법 배열의 기하학적 구조에 따라 WAF를 도출하는 정적(static) WAF는 저류층 물성 및 현장 조건에 대해 고려하지 않기 때문에 부정확한 값을 도출하는 한계가 있어 이를 보완하기 위해 주입 유량, 생산정과 주입정 사이 거리, 주입정 반경 등을 고려한 modified WAF 방법이 제안되었다. 이 연구에서는 정적 WAF와 modified WAF를 적용하여 수공법의 물 주입량을 최적설계하고 결과를 비교 분석하였다. 현장 조건을 고려하지 않는 정적 WAF 보다 modified WAF 방법을 이용하여 물 주입 유량을 설계한 경우 적은 양의 물이 주입되면서 생산되는 물의 양이 감소함과 동시에 추가로 생산할 수 있는 석유의 양이 증가하는 것을 확인하였다. 특히 modified WAF 방법은 주입정과 생산정 사이 거리의 변화가 클 경우 주입 유량 최적설계에 효과적임을 확인할 수 있었다.

주요어 : 석유생산, 수공법, well allocation factor, 주입량 최적설계

Abstract - For successful operation of waterflooding which is one of secondary recovery methods, suitable water injection allocation is important to increase oil recovery. Well allocation factor(WAF) which is one way to quantify the injector and producer connectivity, is utilized to allocate water injection of waterflooding. Static WAF cannot represent the field condition and can induce incorrect value. To compensate for limitation of static WAF, modified WAF which includes several parameters that affect patterns including well radius, distance between wells, and injection rates is proposed. In this study, static and modified WAFs were applied to injection optimization of waterflooding and results by each WAF were compared. In case of modified WAFs, produced water were less and produced oil were more than case of static WAF especially in big change of distance between producer and injector. Therefore, modified WAFs can allocate water injection more efficiently than static WAF.

Key words : Oil production, waterflooding, well allocation factor(WAF), injection allocation optimization

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro,
Basan 49112, Korea
Tel : 051-410-4682 E-mail : jslim@kmou.ac.kr

1. 서론

수공법(waterflooding)은 석유의 1차 회수 이후 잔존하는 석유자원을 회수하기 위하여 생산정 주위에 주입정을 통해 물을 주입하여 잔존 석유를 생산정으로 밀어내는 방법으로 석유 회수량 증진을 위해 일반적으로 널리 행해지고 있는 기법이다 [1-2]. 주입정 별 물 주입량에 따라 석유 생산량이 달라지므로 다수의 주입정이 설치되어 있는 현장에서 수공법을 성공적으로 수행하기 위해서는 주입정 별 적절한 물 주입량을 할당하는 것이 중요하다. 이를 위해 계산이 간편한 장점이 있는 정적(static) WAF(Well Allocation Factor)를 가장 보편적으로 사용한다 [3-5]. 그러나 정적 WAF 계산 방식에 고려되지 못한 변수가 많아 현장 조건을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있으므로 정적 WAF의 대안에 대한 관심이 커지고 있고 최근에는 정적 WAF의 한계를 보완하기 위해 현장 조건을 고려한 수정된(modified) WAF를 사용하여 시간에 따라 변화하는 정도를 고려함으로써 정적 WAF보다 정확한 값을 도출할 수 있다 [3, 4]. 계산된 WAF를 통해 생산 저류층 체적에 대한 주입 저류층 체적의 비율을 나타내는 변수로 수공법의 효율성을 분석하기 위하여 기본적으로 고려해야하는 주요 요소인 VRR(voidage replacement ratio)을 도출할 수 있고 VRR이 1에 근접한 값을 가질 경우 주입되는 양과 생산되는 양이 균형을 이루게 되어 저류층의 압력이 안정화되며 석유 회수율이 향상되기 때문에 VRR이 1에 근접한 값을 가지도록 각 블록이나 패턴에 적합한 WAF에 따라 적절한 물 주입량을 고려하는 것이 중요하다.

이 연구에서는 수공법을 모사한 시뮬레이션을 수행하여 주입정 별 일정 물 주입량, 정적 WAF, 현장 조건을 추가로 고려한 modified WAF 적용 결과를 분석

하고자 하였다.

2. Well Allocation Factor(WAF)

WAF는 생산정과 주입정 사이 관계를 정량화하는 변수로 수공법 적용 시 물의 적절한 주입량을 할당하기 위하여 이용한다 [3-5]. 정적 WAF는 수공법의 블록(block) 또는 패턴(pattern)의 기하학적 구조에 따라 WAF 값을 설정하는 방법으로, Fig. 1(a)과 같이 수공법의 블록이나 패턴 내부에 존재하는 유정의 경우 정적 WAF는 1로 할당되며, 두 블록이나 패턴 사이에 존재하는 주입정의 경우 정적 WAF는 0.5로 할당된다. Fig. 1(b)와 같이 블록의 모서리에 주입정이 위치하는 경우 정적 WAF는 블록에 의해서 나뉘는 정도에 의해 WAF가 계산된다. 수공법의 블록(패턴) i 내 주입정 j 에서의 정적 WAF는 식(1)과 같다 [4].

$$WAF_{ij}^{Static} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_k \alpha_{kj}} \quad (1)$$

정적 WAF는 균질하고 등방성인 저류층, 생산정과 주입정 사이 거리가 동일, 모든 주입정의 주입량이 동일하거나 다른 구역에 있는 주입정들은 서로 영향을 받지 않는다는 가정을 만족하여야 한다. Fig. 2(a)와 같이 위의 가정을 만족하는 경우 정적 WAF를 적용한다면 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있으나, Fig. 2(b)와 같이 주입 유량이 다르거나 위의 가정을 만족하지 않는 경우 정적 WAF는 부정확한 값을 도출하는 한계가 있다 [3-4].

주입 유량, 생산정과 주입정 사이 거리, 주입정 반경 등을 고려한 modified WAF는 현장 조건을 반영하여

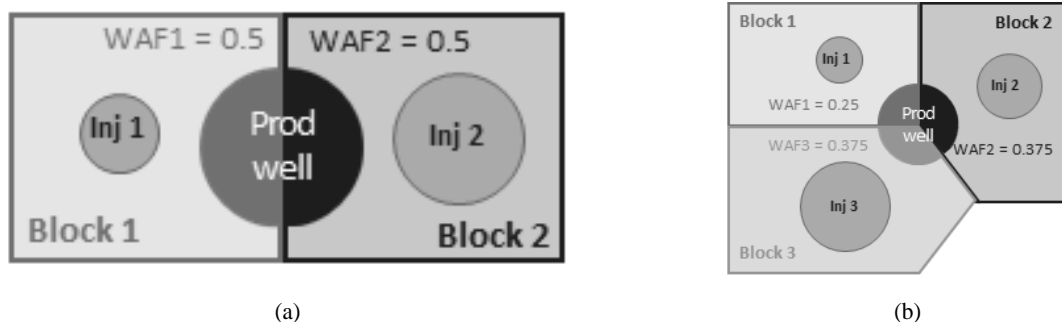


Fig. 1. Results of static WAF calculation[4].

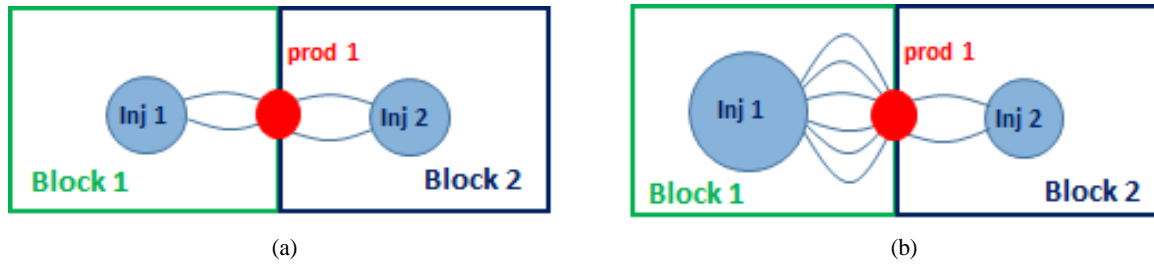


Fig. 2. (a) equal injection in two adjacent blocks;
(b) injection in Block 1 is higher than injection in Block 2.

Table 1. Properties of reservoir used in simulation

Properties		Value
Porosity		0.3
Permeability	x-direction	400 md
	y-direction	400 md
	z-direction	40 md
Reservoir temperature		37.78 °C
Initial pressure		8,549 kPa
GOR		0
Simulation time		3 years

현장 조건에 따라 WAF 값이 유동적으로 변화하기 때문에 정적 WAF보다 정확한 값을 도출할 수 있다. Modified WAF는 식(2)와 같이 주입유량을 고려하는 방법과 식(3)과 같이 주입유량, 주입정 반경, 생산정과 주입정 사이 거리를 고려하는 방법으로 분류할 수 있다.

$$WAF_{ij}^{Modified\ 1} = \frac{Q_{(i)}^{Inj} \times WAF_{ij}^{Static}}{\sum_k Q_{(k)}^{Inj} \times WAF_{kj}^{Static}} \quad (2)$$

$$WAF_{ij}^{Modified\ 2} = \frac{Q_{(i)}^{Inj} \times \ln\left(\frac{r_i}{r_{wi}}\right)}{\sum_{i=1}^n Q_{(i)}^{Inj} \times \ln\left(\frac{r_i}{r_{wi}}\right)} \quad (3)$$

3. WAF를 적용한 수공법의 주입량 최적설계 방법

3-1. 저류층 모델

이 연구에서는 상용 시뮬레이터인 CMG STARS를

이용하여 수공법을 모사하였으며, 저류층 모델 구축을 위해 사용된 물성은 Table 1과 같다.

모델의 격자수는 35×35×8개로 정사각형 형상의 가상 저류층을 가정하였고 수공법 시뮬레이션을 위해 설계된 주입정 및 생산정 조건 자료는 Table 2와 같다. 수공법 적용을 시작하고 총 3년간 생산하는 것을 가정하였고 저류층 모델에 적용한 수공법의 유정 배치는 Fig. 3과 같이 생산정과 주입정 사이의 거리의 변화에 따라 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)로 분류하여 연구를 수행하였다.

3-2. 수공법 주입량 최적설계 과정

WAF를 적용하여 수공법의 물 주입량 최적설계 과정은 Fig. 4와 같다. 여기서 VRR은 생산 유체 부피에 대한 주입 유체부피의 비율을 나타내는 변수로 물 주입량의 손실이나 수공법의 접촉 효율성을 분석하기 위하여 널리 활용된다 [6]. VRR은 식(4)~(7)을 통해 계산가능하며, 1에 근접한 값을 가질 경우 주입되는 양과 생산되는 양이 균형을 이루게 되어 저류층의 압력이 안정화되고 석유 회수율이 향상되기 때문에 VRR이

1에 근접한 값을 가지도록 각 블록이나 패턴에 적합한 WAF에 따라 적절한 물 주입량을 고려하는 것이 중요하다 [3, 7-10].

$$VRR_{(i)} = \frac{Q_{(i)}^{Inj} \times B_w}{[Q_{(i)}^{OilProd} \times B_o] + [Q_{(i)}^{WaterProd} \times B_w]} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Cum VRR_{(i)} \\ = \frac{Q_{(i)}^{Cum Inj} \times B_w}{[Q_{(i)}^{Cum OilProd} \times B_o] + [Q_{(i)}^{Cum WaterProd} \times B_w]} \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q_{(i)}^{OilProd} = \sum_j [Q_{well(j)}^{OilProd} \times WAF_{ij}] \quad (6)$$

$$Q_{(i)}^{WaterProd} = \sum_j [Q_{well(j)}^{WaterProd} \times WAF_{ij}] \quad (7)$$

저류층 시뮬레이션을 통해 WAF와 VRR을 도출한 후 모든 블록의 VRR이 1에 근접하도록 오차가 10% 이내가 되거나 오차가 증가하는 경우 최적설계 과정을 멈

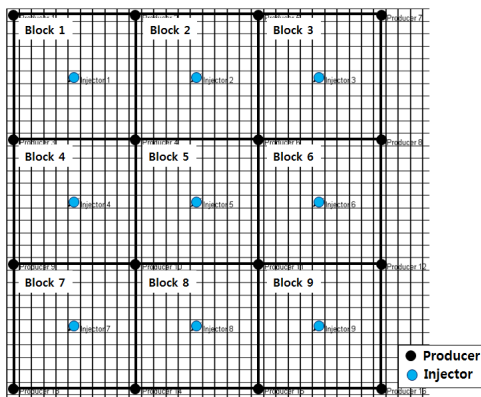
추었다. 이를 만족하지 못하는 경우 VRR이 1이 되도록 모든 블록의 물 주입량을 갱신하는 과정을 반복적으로 수행하여 물 주입량을 설계하였다. 기본 모델(base case)은 Table 2와 같이 모든 주입정의 주입량을 50m³/day로 설정하였다. 정적 WAF를 적용해 도출된 VRR 값이 1에 근접하도록 물 주입량을 설계한 것을 ‘Static’, 주입 유량을 고려한 modified WAF에 따라 도출된 VRR이 1에 근접하도록 물 주입량을 설계한 것을 ‘Modified 1’, modified WAF에 따라 도출된 VRR이 1에 근접하도록 물 주입량을 설계한 것을 ‘Modified 2’로 설정하여 결과를 분석하였다.

4. 수공법 물주입량 최적설계 결과

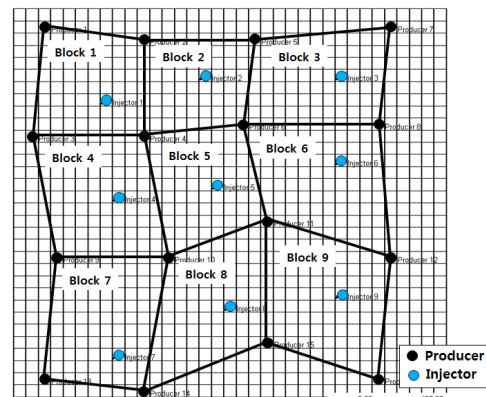
주입량 및 유정 간 거리의 변화에 따라 세 가지 경우로 분류하여 WAF를 도출하였으며, 각 경우별로 도출된 모든 블록의 정적 및 modified WAF의 히스토그램을 나타낸 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 3(a)와 같이 모든 블록의 물 주입량과 생산정 및 주입정 사이 거리의 변화가 없는 조건을 ‘CASE 1’, CASE 1에서 모든

Table 2. Input data of injector and producer

Well type	Parameter	Value
Producer	BHP	200 kPa
	liquid flow rate	100 m ³ /day
Injector	water flow rate	50 m ³ /day



(a) All the same distance between producer and injector



(b) All the different distance between producer and injector

Fig. 3. Schematic of waterflooding blocks.

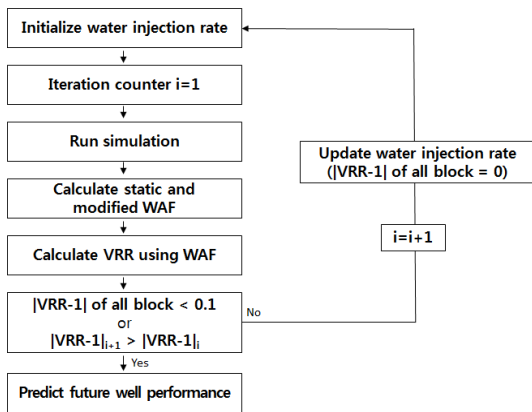
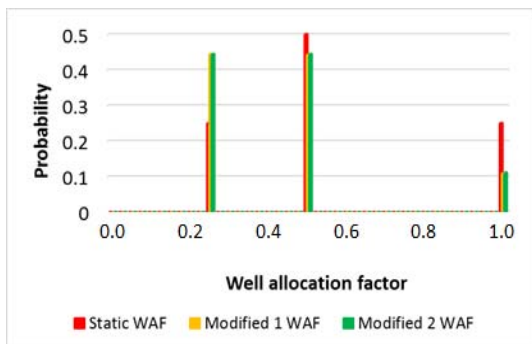
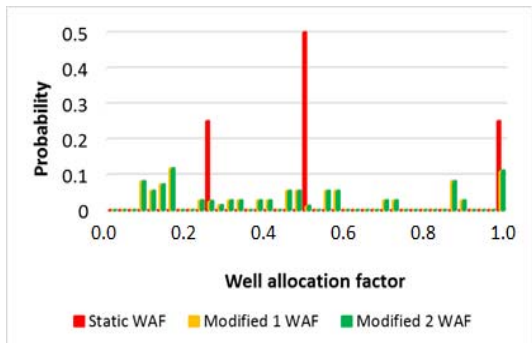


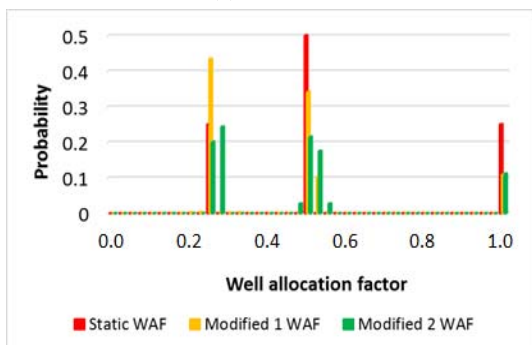
Fig. 4. Water injection optimization workflow.



(a) CASE 1

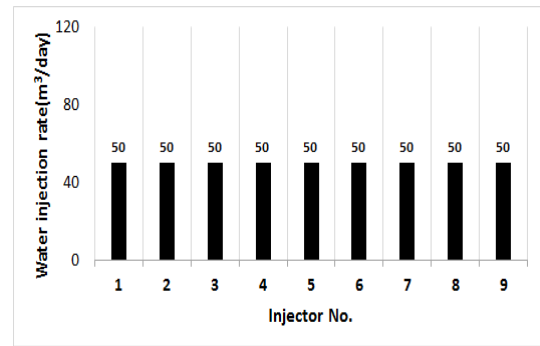


(b) CASE 2

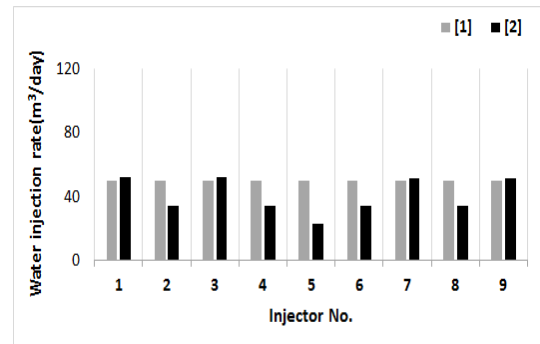


(c) CASE 3

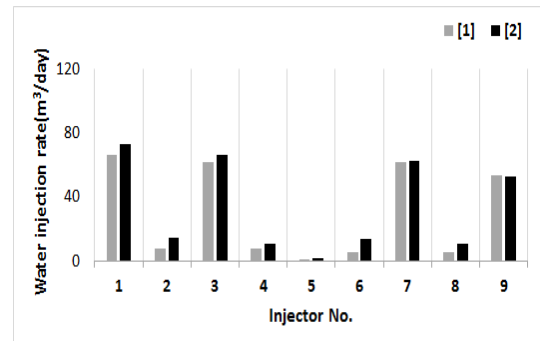
Fig. 5. Static and modified WAF histogram of all block.



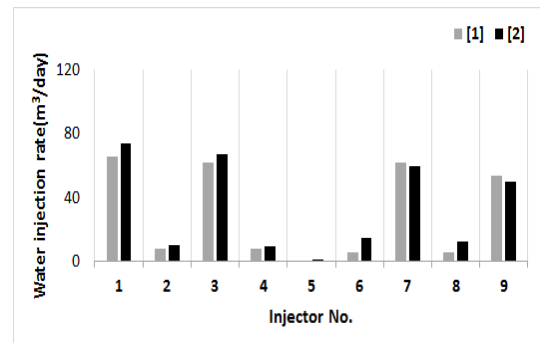
(a) Base case



(b) Static



(c) Modified 1



(d) Modified 2

Fig. 6. Optimized water injection([1] All the same distance between producer and injector; [2] All the different distance between producer and injector).

Table 3. Percentage change from the base case

Model	Parameter	Percentage change from the base case		
		Static	Modified 1	Modified 2
[1]	Cum water injection	-22.0%	-40.0%	-40.0%
	Cum water production	-8.4%	-28.0%	-28.0%
	Increased oil recovery	46.0%	47.0%	47.0%
[2]	Cum water injection	-18.0%	-31.8%	-33.3%
	Cum water production	-4.6%	-18.8%	-20.4%
	Increased oil recovery	21.0%	54.0%	55.0%

([1] All the same distance between producer and injector; [2] All the different distance between producer and injector).

블록의 주입 유량을 다양하게 변화시킨 조건을 ‘CASE 2’, Fig. 3(b)와 같이 CASE 1에서 생산정과 주입정 사이 거리만 변화시킨 ‘CASE 3’으로 분류하였다. CASE 1의 경우 정적 및 modified WAF가 고정된 값을 가지는 것을 파악할 수 있지만(Fig. 5(a)), CASE 2의 경우 고정된 값을 가지는 정적 WAF 값과는 달리 주입량의 변화를 반영하는 modified WAF는 유량의 변화에 따라 다양한 값의 분포가 나타나는 것을 확인하였다(Fig. 5(b)). CASE 3의 경우 생산정과 주입정 사이 거리 변화를 반영하는 modified WAF는 고정된 값이 아닌 거리에 변화에 따라 다양한 분포의 값이 나타났으나 유량을 변화시킨 CASE2 보다는 WAF 분포가 좁은 것을 확인하였다(Fig. 5(c)).

도출된 WAF를 이용하여 물주입량을 설계하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 정적 WAF를 적용한 경우 주입정 별로 주입량이 달라지면 물주입량 변화에 반영되지 않았으나 유정 별 거리가 달라지면 각 유정별 구역 각도가 변하여 물주입량 변화에 반영되는 것을 확인할 수 있었다. Modified 1과 Modified 2의 경우 주입 유량 및 생산정과 주입정 사이 거리에 따른 변화를 반영하여 주입정 별로 다양하게 물주입량이 할당되는 것을 확인할 수 있었고 정적 WAF에 비해 물주입량 변화 폭이 큰 것을 확인하였다. 생산정과 주입정 사이 거리의 배열에 따라 도출된 VRR은 Fig. 7, Fig. 8이다. Base case에서 물 주입 최적설계를 통해 VRR이 1에 근접한 값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 생산정과 주입정 사이 거리가 같을 경우 거리에 따른 변화가 상쇄되어 Fig. 7과 같이 Modified 1과 Modified 2의 VRR 값이 같은 값을 나타낸다. 생산정과 주입정 사이 거리 변화가 있을 경우 거리에 따른 변화를

반영하여 Modified 1과 Modified 2의 VRR 결과가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

정적 및 modified WAF에 따른 수공법의 물주입량 할당 효율성을 분석하기 위해 생산정과 주입정 거리의 배열에 따라 석유 생산량, 물 생산량, 석유 회수율 등을 분석하였다(Table 3). Fig. 9는 생산정과 주입정 사이 거리가 동일한 경우 누적 석유 및 물 생산량, 물 주입량, 석유 회수율을 나타낸 것이다. 기본 모델을 기준으로 누적 물 주입량은 Static, Modified 1, Modified 2 순으로 각각 22.0%, 40.0%, 40.0% 감소하며, 누적 물 생산량은 각각 8.4%, 28.0%, 28.0% 감소한다. 석유 회수율은 기본 모델 대비 Static, Modified 1, Modified 2 순으로 각각 46.0%, 47.0%, 47.0%로 증산되어 modified WAF를 이용하여 물 주입량을 설계한 경우 적은 양의 물이 주입되면서 추가로 생산할 수 있는 석유의 양이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 생산정과 주입정 사이 거리에 따른 변화가 없기 때문에 Modified 1과 Modified 2의 결과 값이 동일하게 나타난다. Fig. 10은 생산정과 주입정 사이 거리가 다를 경우 누적 석유 및 물 생산량, 물 주입량, 석유 회수율을 나타낸 것이다. 기본 모델을 기준으로 누적 물 주입량은 Static, Modified 1, Modified 2 순으로 각각 18.1%, 31.8%, 33.3% 감소하며, 누적 물 생산량은 각각 4.6%, 18.8%, 20.4% 감소한다. 석유 회수율은 기본 모델 대비 Static, Modified 1, Modified 2 순으로 각각 21.0%, 54.0%, 55.0%로 modified WAF 중에서도 주입정 변경, 생산정과 주입정 사이 거리, 주입 유량 등을 고려한 WAF 방법을 이용하여 물 주입량을 설계한 경우 적은 양의 물이 주입되면서 추가로 생산할 수 있는 석유 생산량이 증가하는 것을 확인할 수

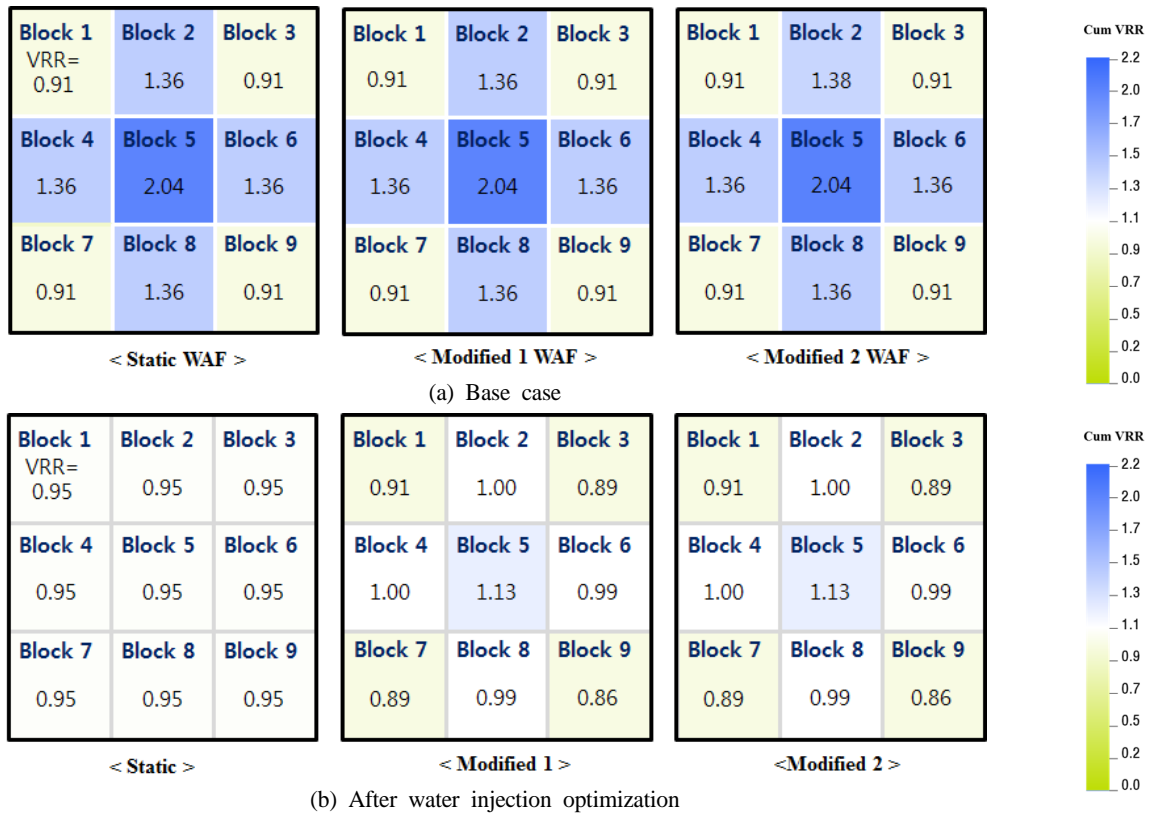


Fig. 7. Cumulative VRR(All the same distance between producer and injector).

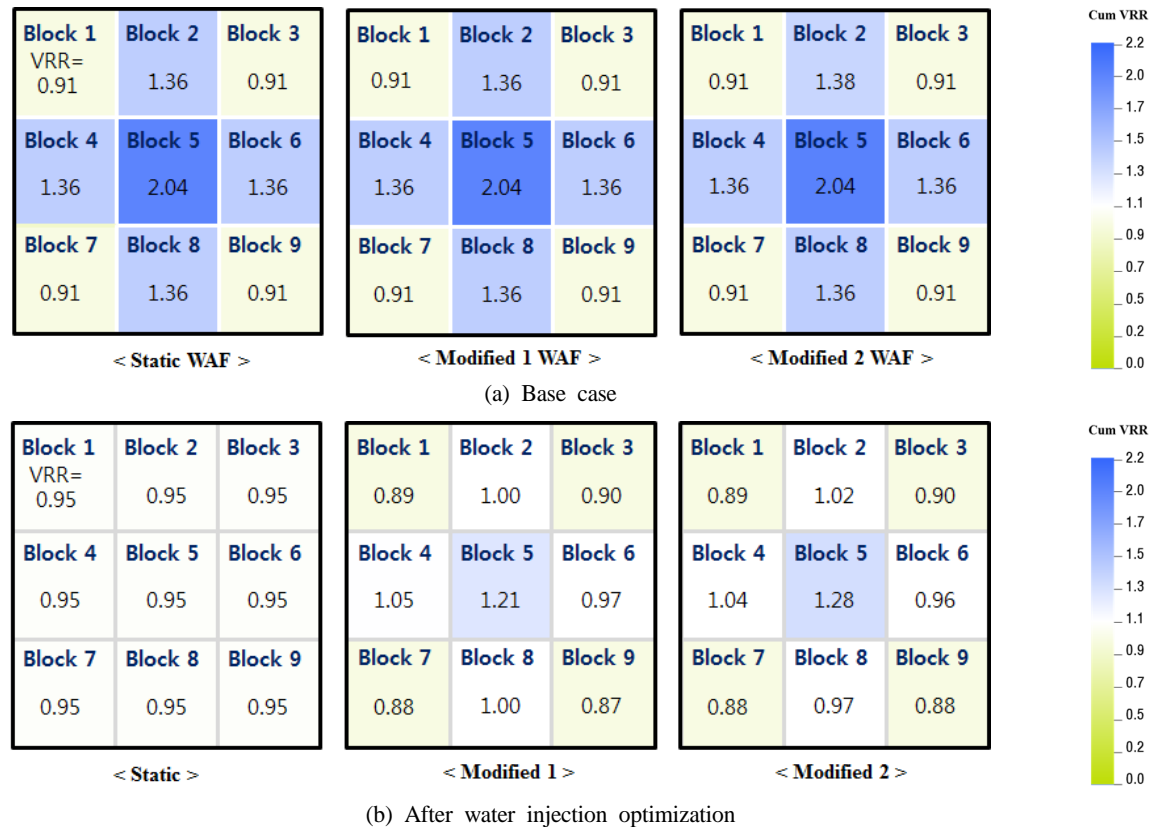


Fig. 8. Cumulative VRR(All the different distance between producer and injector).

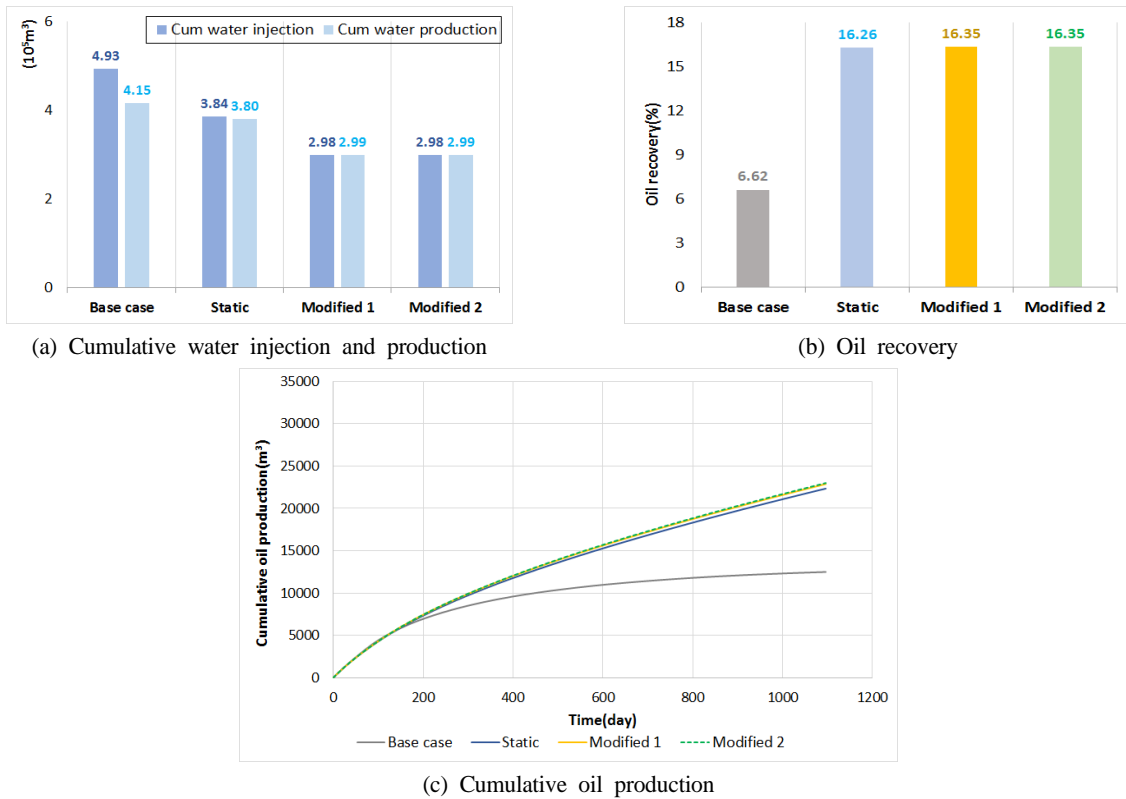


Fig. 9. Cumulative production and injection and oil recovery(All the same distance).

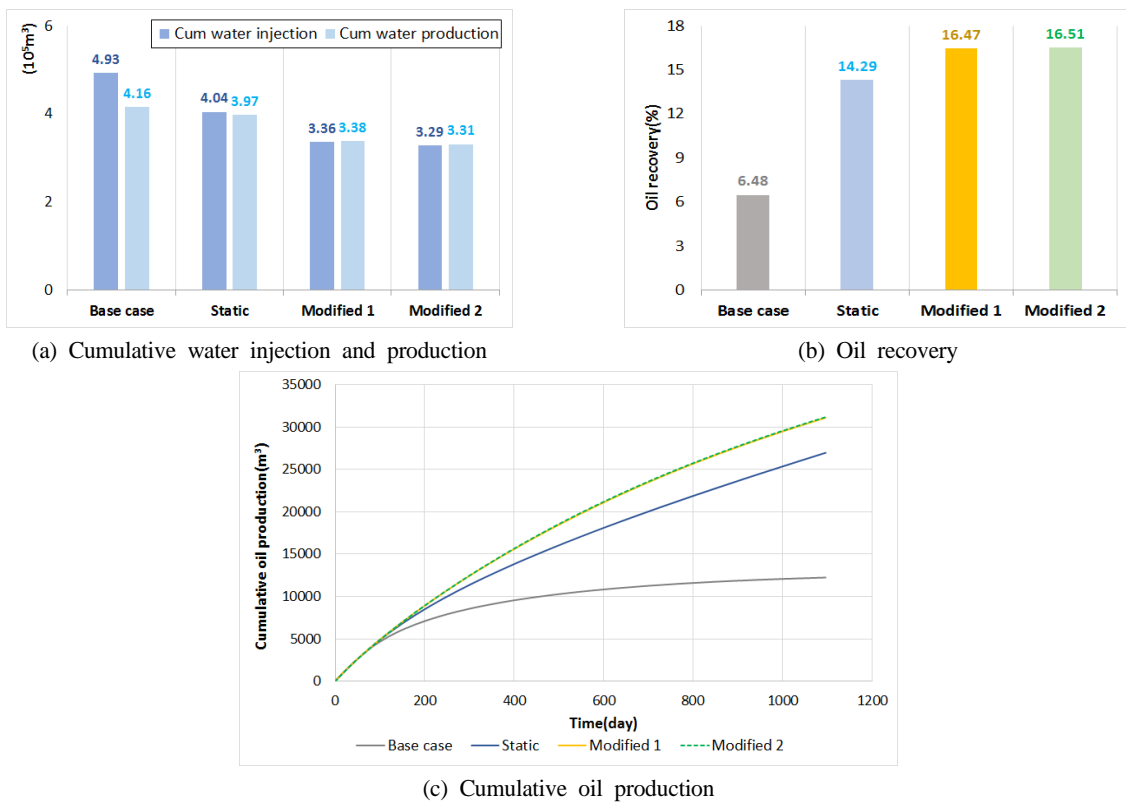


Fig. 10. Cumulative production and injection and oil recovery(All the different distance).

있다. 대부분 현장의 조건처럼 주입정과 생산정 사이 거리의 변화가 클 경우 주입정 반경, 생산정과 주입정 사이 거리, 주입 유량을 고려한 modified WAF 방법이 현장 조건을 고려하지 않는 정적 WAF 보다 물주입량 최적설계에 효과적인 것으로 사료된다.

5. 결론

수공법의 주입량을 할당하기 위해 일반적으로 사용되는 정적 WAF는 계산은 간단하나 시간에 따라 변하는 저류층 물성 및 현장 조건에 대해 고려하지 않기 때문에 부정확한 값을 도출하는 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하고자 이 연구에서는 주입 유량, 생산정과 주입정 사이 거리, 주입정 반경 등을 고려한 modified WAF를 이용하여 물 주입량을 최적설계하는 방법을 제안하고, 석유 생산량 및 물 생산량, 석유 회수율 등의 변화양상을 비교 분석하여 그 적용성을 확인하여 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 생산정과 주입정 사이 거리가 동일한 경우 modified WAF를 이용하여 물 주입 유량을 설계한 경우 적은 양의 물이 주입되면서 석유 회수율은 향상됨을 확인 하였다. 또한 생산정과 주입정 사이 거리에 따른 변화가 없기 때문에 Modified 1 과 Modified 2 의 결과 값이 동일하게 나타남을 확인할 수 있었다.
2. 생산정과 주입정 사이 거리가 다를 경우 modified WAF 중에서도 주입정 반경, 생산정과 주입정 사이 거리, 주입 유량 등을 고려한 Modified 2 WAF 방법을 이용하여 물 주입 유량을 설계한 경우 적은 물주입량으로 석유 회수율이 향상됨을 확인 하였다. Modified 2 WAF를 이용한 물 주입량 설계 방법은 대부분 현장의 조건처럼 주입정과 생산정 사이 거리의 변화가 클 경우 현장 조건을 고려하지 않는 정적 WAF 보다 물 주입량 설계에 효과적임을 확인할 수 있었다.

이 연구에서 적용한 modified WAF방법을 이용하여 다양한 현장 조건을 반영한 수공법의 효율성 분석이 가능할 것으로 사료되며, 향후 주입정과 생산정 사이 거리의 변화가 크거나 시간에 따른 유량의 변화가 큰 실제 현장 조건에서 수공법의 설계 및 운영 시 최적 생산 계획 수립에 대한 합리적인 의사 결정 도구로

써 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

사용 기호 및 아래 첨자

α_{ij}	= inside angle at the vertex of block (pattern) i , where well j is located
B_o	= oil formation volume factor
B_w	= water formation volume factor
$Cum VRR_{(i)}$	= cumulative voidage replacement ratio of block(pattern) i
$Q_{(i)}^{Cum Inj}$	= cumulative injection of block (pattern) i
$Q_{(i)}^{Cum OilProd}$	= cumulative oil production of block (pattern) i
$Q_{(i)}^{Cum WaterProd}$	= cumulative water production of block(pattern) i
$Q_{(i)}^{Inj}$	= injection of block(pattern) i
$Q_{(i)}^{OilProd}$	= oil production of block(pattern) i
$Q_{(i)}^{WaterProd}$	= water production of block(pattern) i
r_i	= distance between the production well and the i th injection well
r_{wi}	= wellbore radius of the i th injection well
$VRR_{(i)}$	= voidage replacement ratio of block(pattern) i
WAF_{ij}^{Static}	= static well allocation factor for well j in block(pattern) i
$WAF_{ij}^{Modified}$	= modified well allocation factor for well j in block(pattern) i

사 사

이 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 2013251010005C) 및 자원개발특성화대학사업 지원을 받아 수행하였습니다.

References

1. Trung, P.N.; Duc, N.T. Optimization Injection and Production Allocation in Multi-well Water-

- flooding Project using Optimization Algorithms and Artificial Neural Network, SOCAR, 2010, 16~23.
2. Liu, F.; Guthrie, C.; Shipley, D. Optimizing Water Injection Rates for a Water-flooding field, Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, U.S.A., 2012.
 3. Saadatpoor, E.; Karami, H.; Al-Ajmi, M.F. A New Method for Dynamic Calculation of Pattern Allocation Factors in Waterflood Monitoring, Proceedings of the SPE Improved Oil Recovery Symposium, Oklahoma, U.S.A., 2012.
 4. Ivan, A.; Maria, B.; Rustem, G.; Andrey, G.; Danila, K.; Anton, L. Comparative analysis of different techniques for waterflood efficiency assessment, Proceedings of the SPE Russian Oil & Gas Exploration Technical Conference and Exhibition, Russia, 2012.
 5. Gladkov, A.; Kondakov, D.; Gareev, R.; Belyanushkina, M.; Lvov, A.; Arsenevsky, I. Streamlines for the Target Injection Calculation in Complex Field Conditions, Proceedings of the SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition, Russia, 2013.
 6. Robert, A.C.; Brian, L. Voidage Replacement Ratio Calculations in Retrograde Condensate to Volatile Oil Reservoirs Undergoing EOR Processes, Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Colorado, U.S.A., 2003.
 7. Robert, A.C.; James, L.; Hossein, K.; Moudi, A. Pattern Balancing and Waterflood Optimization of a Super Giant: Sabiriyah Field, North Kuwait, a Case Study, Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, Dubai, U.A.E., 2007.
 8. Al-Ajmi, M.; Al-Hamer, M.; Al-Anzi, E.; Al-Muwail, M.; Al-Anzi, H. Innovative Pattern Balancing and Waterflood Optimization of a Super Giant Carbonate Mauddud Reservoir, Sabiriyah Field, North Kuwait, Proceedings of the SPE/EAGE Reservoir Characterization and Simulation Conference, Abu Dhabi, U.A.E., 2007.
 9. Al-Ajmi, M.; El-Daoushy, A.; Ashkanani, F.; Saleh, I.; Pathak, A.; Hamadi, H. Innovative Pattern Balancing and Waterflood Optimization of a Super Giant Carbonate Mauddud Reservoir, Raudhatain Field, North Kuwait, Proceedings of the SPE Digital Energy Conference and Exhibition, Texas, U.S.A., 2011.
 10. Awotunde, A. A.; Sibaweih, N.; Fahd, K. Consideration of Voidage Replacement Ratio in Well Placement Optimization, Proceedings of the SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, Kuwait City, Kuwait, 2012.