



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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

증기챔버 간섭을 고려한 SAGD 생산
필드의 웨지정 공법 최적 운영

**Optimized Operation of Wedge-well Technology
in Steam Assisted Gravity Drainage System
Considering Interwell Steam Interference**

2013년 2월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
정 순 형

초 록

웨이징 공법은 SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage) 공법을 운영 중인 유정 인근에 추가정을 시추하여 비튜멘 생산량을 높이는 증진회수기법이다. 기존 연구들은 균질 저류층에서의 증기챔버 성장양상 분석에 국한되어서 비균질 저류층에서 유정 간 증기 채널링 현상을 고려하지 못하였다.

이 연구는 비균질 저류층에서도 SAGD 증기챔버간 간섭효과를 고려할 수 있는 웨이징 공법의 최적 운영방안을 도출하였다. 시나리오 분석을 통해 웨이징의 시추시기를 결정한 후, 인공신경망을 사용하여 웨이징의 증기 주입압력을 조절하였다. 제안한 기법을 캐나다 Athabasca 지역에 위치한 오일샌드전에 적용하여 그 신뢰도를 검증하였다.

웨이징은 SAGD 증기챔버가 교차한 이후 시추하는 것이 가장 효율이 높았다. 생산 초반에 웨이징을 시추하면 증기 채널링으로 인해 SAGD 증기챔버가 충분히 발달하지 못하여 비튜멘 생산량이 감소하였다. 웨이징의 증기 주입압력은 SAGD 주입압력보다 높게 유지하여 웨이징의 압력으로 전체 생산 시스템을 제어하는 것이 가장 효율적이었다. 생산 후반에는 웨이징의 증기 주입압력을 줄여 잠열을 이용함으로써 상대적으로 낮은 누적 증기오일비를 유지하였다. 제안한 방법은 증기 챔버의 성장을 웨이징의 시추시기와 증기압력을 통하여 조절함으로써 비튜멘 회수율과 열효율이 높은 SAGD 생산계획 수립이 가능하다.

주요어: 웨이징, SAGD, 인공신경망, 오일샌드

학 번: 2011-21108

목 차

초 록	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	7
2.1 오일샌드 생산 공법 개요	7
2.2 CSS (Cyclic Steam Stimulation) 공법	8
2.3 SAGD (Steam-Assisted Gravity Drainage) 공법	10
2.4 기타 용매 주입법	11
2.5 웨지정(Wedge well) 공법	14
2.6 인공신경망	16
3. 증기챔버의 발달 양상의 감지를 위한 인자 개발	20
3.1 기존 SAGD 공법 시뮬레이션	20
3.2 웨지정 공법 시뮬레이션	26
3.3 2차원 균질 저류층에서 SAGD와 웨지정 공법간 비교	35

4. 저류층 불균질성으로 인한 증기 채널링	37
4.1 3차원 비균질 저류층 시뮬레이션	39
4.2 웨지정 공법 시뮬레이션 및 SAGD와 비교	43
5. 인공신경망을 이용한 현장 저류층의 증기 주입압력 최적화	49
5.1 증기 주입압력 최적화 과정	49
5.2 인공신경망 입출력 자료	51
5.3 현장 저류층 시뮬레이션 모델	52
5.4 인공신경망의 예측성능 평가	57
5.5 인공신경망을 이용한 최적 생산 시나리오 선정	59
6. 결 론	62
참고문헌	64
ABSTRACT	67

List of Tables

Table 2.1 The process of oilsands recovery	12
Table 2.2 Comparison of BNN and ANN	18
Table 3.1 Reservoir properties of SAGD model	22
Table 3.2 Well constraints of SAGD model	22
Table 3.3 Well constraints of wedge well model	29
Table 3.4 Comparison of SAGD, Wedge – A and Wedge – B at 2022	35
Table 4.1 Reservoir properties of 3D heterogeneous model	40
Table 4.2 Well constraints of SAGD model	40
Table 4.3 Well constraints of wedge well model	45
Table 4.4 Comparison of SAGD, Wedge – A and Wedge – B at 2022	46
Table 4.5 Comparison of SAGD, Wedge – A and Wedge – B at 2030	46
Table 5.1 Reservoir factor and value	56
Table 5.2 Wedge well production time period for optimization	58
Table 5.3 Prediction performance of the ANN model	58
Table 5.4 Top 5 optimal production scenarios for steam injection pressure	60
Table 5.4 Comparison of cumulative oil production and cSOR for the oilsands field	60

List of Figures

Figure 1.1 Oilsands in Canada.	1
Figure 2.1 CSS(Cyclic Steam Stimulation).	9
Figure 2.2 SAGD(Steam-Assisted Gravity Drainage).	10
Figure 2.3 The process octagon : agents for bitumen mobilization and processes found in the patent and literature.	11
Figure 2.4 SAGD wells and wedge well.	15
Figure 2.5 Schematic diagram of a biological neuron.	17
Figure 2.6 Schematic diagram of an artificial neural network.	17
Figure 3.1 Schematic diagram of SAGD model.	23
Figure 3.2 Cumulative steam oil ratio of SAGD model.	23
Figure 3.3 Cross section of reservoir pressure.	24
Figure 3.4 Cross section of reservoir temperature.	25
Figure 3.5 Schematic diagram of wedge well model.	29
Figure 3.6 Cumulative steam oil ratio of ‘Wedge – B’ Model (a) total field (b) each well pair.	30
Figure 3.7 Steam injection rate of each well pair(Wedge – B).	31
Figure 3.8 Cumulative steam oil ratio of ‘Wedge – A’ Model (a) total field (b) each well pair.	33
Figure 3.9 Steam injection rate of each well pair(Wedge – A).	34
Figure 3.10 Recovery factor of SAGD, Wedge – B and Wedge - A.	36
Figure 3.11 Cumulative steam oil ratio of SAGD, Wedge – B and Wedge – A.	36
Figure 4.1 Steam Channeling of wedge well model.	38
Figure 4.2 3D heterogeneous model.	41

Figure 4.3 Cross section of 3D heterogeneous model.	41
Figure 4.4 Cumulative steam oil ratio of 3D heterogeneous model.	42
Figure 4.5 Recovery factor of 3D heterogeneous model.	42
Figure 4.6 Development of steam chamber.	47
Figure 4.7 Recovery factor of SAGD, Wedge – B and Wedge - A.	48
Figure 4.8 Cumulative steam oil ratio of SAGD, Wedge – B and Wedge - A.	48
Figure 5.1 Flow diagram for optimizing wedge well technology using ANN. ...	50
Figure 5.2 Planned SAGD wells.	53
Figure 5.3 3D view of the simulation model.	54
Figure 5.4 J-K cross section of simulation model.	54
Figure 5.5 I-J cross section of simulation model.	55
Figure 5.6 I-K cross section of simulation model.	55
Figure 5.7 Top 5 optimal production scenarios for steam injection pressure.	61

1. 서론

오일샌드는 점성도가 10,000 cp 이상, API 비중이 8-14° 정도로 전통적 석유자원에 비해 높으며 2,000개 이상의 탄소로 구성된 탄화수소로 이루어져 일반적으로 생산, 수송 및 정제가 어렵다. 그러나 전 세계적으로 증가하고 있는 석유자원의 수요를 충족하기 위해 신석유자원 개발의 필요성이 대두됨에 따라 오일샌드에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 캐나다 오일샌드는 원시 부존량이 약 1조 7000억 배럴, 가채매장량이 약 1,740억 배럴로 막대한 양의 석유자원을 보유하고 있으며 앨버타 주의 Athabasca와 Cold Lake, Peace River 지역에 다량 매장되어 있다(Figure 1.1).



Figure 1.1 Oilsands in Canada.

오일샌드는 노천채굴 또는 지하회수기법을 통해 생산되며, 노천채굴의 경우 90% 이상의 높은 회수율을 보이지만 오일샌드 총 매장량의 80%는 심부에 매장되어 있기 때문에 일반적으로 노천채굴기법을 적용하기는 어렵다. 이에 심부에 매장된 오일샌드를 회수할 수 있는 지하회수기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 현재 상업적 생산이 성공적으로 이루어지는 공법으로는 CSS (Cyclic Steam Stimulation), SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage), 그리고 solvent flooding 등이 있다. 특히 캐나다 오일샌드의 경우 SAGD와 CSS가 가장 널리 사용되는 생산 공법으로 알려져 있다.

SAGD 공법은 두 개의 수평정으로 구성되어 있으며 하나의 수평정은 다른 수평정의 위에 위치해 있다. 상부의 수평정을 통해 증기가 주입되며 하부의 수평정으로 증기에 의해 녹은 비튜멘과 응축된 물이 함께 생산된다. CSS 공법은 한 개의 수평정 또는 수직정을 이용하며 세 단계에 걸쳐 증기를 주입 및 비튜멘을 생산한다. 우선, 저류층 파쇄 압력 이상의 고압으로 증기를 주입하여 증기를 저류층에 고루 분포시킨다. 증기가 충분히 주입되면 증기의 주입을 멈추고 유정을 닫아 3-6일 정도의 시간동안 증기의 열이 고루 전달될 수 있도록 기다린다. 마지막으로 유정은 생산정으로 전환되어 가열한 비튜멘을 회수한다. 이 일련의 증기주입 - 휴지 - 비튜멘 생산 과정을 반복하다가 저류층의 경제성이 일정 이하로 떨어질 경우 중단한다.

기존의 상용 생산 공법인 SAGD는 유정 쌍(well pairs) 사이의 회수하기 어려운 지역에 잔류 오일이 발생하고 비튜멘 회수과정에서 다량의 담수와 천연가스를 필요로 한다는 점에서 생산 효율이 낮아질 수 있다. 이에 회수율 극대화를 위한 SAGD 사후공법에 대한 연구가 주목받고 있다. 그 중 웨지정(wedge well) 공법은 두 쌍의 SAGD 유정 사이에 추가정을 시추하여 잔류 오일을 회수하는 기법으로 현재 캐나다 오일샌드 지역에서 활발히 연구되고 있다. 추가정은 주입정 또는 CSS 유정으로 운영되며 SAGD 유정 쌍 사이에 있

는 잔류 오일을 회수하고 SAGD 증기챔버의 확장 속도를 증진시킴으로써 비튜멘의 회수효율을 극대화할 수 있다.

Polikar 등(2000)은 캐나다의 Cold Lake 지역 Clearwater 저류층에 대해 웨지정 공법 시뮬레이션을 수행하였다. SAGD 유정에서 50 m 떨어진 위치에 웨지정을 운영함으로써 SAGD 증기챔버와 추가정 간의 유체 교환이 이루어지게 하였다. 결과적으로 SAGD 증기챔버의 발달 속도를 증진시키는 효과를 가져왔으며, 웨지정 부근의 오일을 생산하게 되면서 추가적인 오일 회수를 가능하게 하였다. 이를 통해 비튜멘의 생산과 증기-오일비를 감소시킬 수 있었으며 전반적인 SAGD 공법의 효율성을 증진시켰다.

그러나 대상 저류층을 2차원 균질 저류층으로 가정하여 SAGD 증기챔버 발달이 균질하지 않은 경우에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 또한 SAGD 공법의 경우 저류층 크기에 비해 SAGD 유정의 수가 적게 설치되어 유정의 수가 많은 웨지정 공법이 유정의 수가 적은 SAGD 공법보다 유리한 모델이라는 한계가 있다. 마지막으로 웨지정 공법의 장점을 부각하기 위해 SAGD 주입압력이 저류층 평균 압력보다 10 kPa 정도만 높게 설정되어 실제 현장 운영 조건과 상이하다는 점에서 한계를 가지고 있다.

Shin 등(2006)은 캐나다 Alberta 지역의 대표 오일 샌드층인 Athabasca, Cold Lake, Peace River 저류층을 2차원 균질 저류층으로 모델링 후 저류층 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 웨지정 공법은 유체투과율이 1 Darcy 미만인 저류층 또는 두께가 25 m 이하인 저류층에서 SAGD 공법보다 효과가 좋은 것으로 나타났다. 즉 Cold Lake와 Peace River 저류층이 웨지정 공법 적용에 적합함을 밝혀냈다. 또한 웨지정의 개시 시점이 SAGD 시작 후 1.5년인 경우가 최적임을 밝혔다.

Shin 등(2007)은 SAGD와 웨지정 공법의 운영 조건과 저류층 인자에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 유체투과율이 2.5 Darcy 이상이며 두께가 25 m

이상인 저류층에 대해서는 SAGD 공법이 효율적임을 밝혔다. 또한 같은 조건이라면 웨지정 공법이 SAGD 공법에 비해 에너지 효율을 24% 증진시켰으며, 생산성을 35% 증진하였다. 수직 유체투과율이 1.25 Darcy이며 저류층 두께가 20 m인 저류층에서는 SAGD와 추가정 사이의 유정 간격이 50 m 일 경우가 가장 최적이었으며 최대 증기주입 압력이 8,000 kPa일 때 최적임을 보였다. 마지막으로 두 개의 SAGD 유정 시스템 사이에 두 개의 추가정을 시추하여 총 6개의 유정을 이용하는 것이 기존 두 개의 SAGD 유정 시스템만 이용하는 경우보다 경제적임을 보였다.

그러나 Shin 등(2006, 2007)의 연구 역시 저류층 모델을 2차원 균질 저류층으로 가정하였으므로 연구에서 도출된 최적 운영 조건이 실제 현장 모델에 적합한 것인지에 대한 검증이 부족하다. 또한 Polikar 등(2000)의 연구와 마찬가지로 설정한 운영 조건이 웨지정에 유리하게 설정되어 있다는 한계를 가지고 있다.

Arthur 등(2009)은 두 개의 SAGD 유정 사이에 하나의 추가 주입정을 설치하는 방법을 제안하였다. 두 개의 SAGD 유정 시스템의 유동성 지역이 합쳐질 때 추가 주입정을 시추하여 증기와 탄화수소 같은 유동성 유체를 주입한다. 추가유정에서 주입된 유동성 유체는 두 개의 SAGD 유정 시스템과 추가 유정간의 유체 교환을 만든다. 제안된 방법은 기존 SAGD에 비해 회수율과 에너지 효율을 증진 시키는 결과를 보였다. 그러나 두 개의 SAGD 유정 시스템의 유동성 지역이 합쳐지는 시기를 인지할 수 있는 방법에 대한 연구가 이루어지지 않아 현장 적용에 한계가 있다.

Coskuner 등(2009)은 웨지정의 변형기법인 Hybrid SAGD 기법을 제안하였다. 이 기법은 초반에 SAGD 주입정과 추가정을 모두 CSS 유정으로 운영 후 나중에 SAGD 모드로 전환하는 방법이다. 결과적으로 Hybrid SAGD는 웨지정과 SAGD 보다 회수율과 에너지 효율이 높았다. 하지만 이 연구에서 이용한

저류층 모델이 SAGD 공법보다 웨지정 공법을 이용하는 경우가 더 유리한 저류층이었기 때문에 Hybrid SAGD를 SAGD 생산 필드에 적용 시 더 좋은 결과를 보일 가능성이 낮다.

기존 연구는 다음의 한계를 지니고 있다. 첫째, 현장 저류층에서 증기챔버의 발달 양상을 감지하는 방법에 대한 연구가 부족했다. 기존 웨지정 공법 연구는 대개 시뮬레이션을 바탕으로 진행되어왔다. 그래서 저류층 온도 단면과 같은 시뮬레이션 기반 자료로부터 ‘두 개의 SAGD 유정 시스템의 유체교환이 이루어지는 시점’이나 ‘SAGD 유정과 웨지정의 유체교환이 이루어지는 시점’을 쉽게 알 수 있었다. 그러나 SAGD 시스템 주변에 실제 현장에서 얻을 수 있는 정보는 관측정(monitors well)을 시추하지 않는 경우 저류층 온도를 추측하기 어려우며 오일 생산량, 증기주입량과 같은 생산 추이 곡선만을 얻을 수 있다. 즉, 현재까지는 지상에서의 생산 추이 곡선만을 이용해 증기챔버의 발달 양상을 감지하는 방법에 대한 연구가 부족했다. 그러므로 본 연구에서는 현장에서 얻을 수 있는 정보만으로 증기챔버의 발달 양상을 감지할 수 있는 인자를 개발하여 SAGD 운영시 증기챔버 발달을 현상학적으로 분석하고 이를 현장에 반영할 수 있도록 하였다.

둘째, 기존 SAGD 생산 필드에서 웨지정 공법에 대한 연구는 대부분 2차원 균질 저류층에 대해서만 진행되었다. 그러므로 현장에서 웨지정 공법을 적용하였을 때 나타날 수 있는 문제점을 간과하였다. 실제로 캐나다 Athabasca 지역 B 광구에 대해 웨지정 공법 시뮬레이션 결과, 저류층 비균질성으로 인해 SAGD 유정과 웨지정 사이에 증기채널링 현상이 발생함을 확인하였다. 일반적으로 웨지정의 최대 증기주입 압력이 SAGD 보다 높기 때문에 증기채널링이 발생하는 순간 SAGD 유정에서 증기주입이 중단되어 웨지정 공법의 효율이 급격히 감소하게 된다. 본 연구에서는 앞에서 개발한 감지 인자를 이용해 현장에서 증기채널링을 감지할 수 있는 인자를 제안하였다.

셋째, 기존 연구에서는 현장에서 발생할 수 있는 돌발 상황에 대한 충분한 고려 없이 웨지정의 운영 조건을 전체 생산 기간 동안 운영 조건을 일정하게 유지하였다. 앞에서 언급했듯이 3차원 비균질 저류층에서는 증기채널링 현상이 발생하여 웨지정 공법의 효율이 급격히 감소한다. 그러나 기존 연구에서는 웨지정의 운영 조건을 고정하여 증기채널링 현상을 극복하지 못했다. 그러므로 본 연구에서는 증기 채널링 현상을 극복하고 효율성을 증대하기 위해 웨지정의 최적 운영 시나리오를 제안하였다. 최적화 알고리즘은 인공지능망 방법을 이용하였다.

정리하자면 이 연구에서는 증기채널링 발생 시 SAGD의 운영상 문제점을 현상학적으로 분석하였으며 그 영향을 극복할 수 있는 최적 운영 방안에 대한 연구를 진행하였다. 다수의 생산 시나리오를 평가하기 위하여 연산속도가 빠른 인공지능망 모델을 이용하여 증기 주입압력의 운영조건에 대한 최적화를 수행하였다. 제안한 방법을 캐나다 앨버타 주 Athabasca에 위치한 오일샌드전에 적용하여 효용성을 입증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 오일샌드 생산 공법 개요

캐나다 오일샌드는 유체투과율이 1-8 D 정도로 매우 높지만 높은 점성도로 인해 회수율이 낮다. 열을 이용하지 않는 생산방법을 사용했을 때 회수율은 평균적으로 10%이며, CSS를 이용할 때는 약 25%, SAGD를 이용할 때는 40-60%의 회수율을 보인다. Athabasca 지역의 저류층의 온도는 평균 7-13 °C로 이 때 비튜멘의 점성도는 보통 백만 cp이상이다. 온도를 200 °C 이상으로 상승시킬 경우 비튜멘의 점성도는 약 6 cp까지 하강한다. 그러므로 오일샌드에 열을 가해 점성도를 낮추는 공정을 통해 오일의 유동성을 확보할 수 있다. 비튜멘이 유동성을 갖춘 후, 생산 메커니즘(drive mechanism)에 의해 생산정까지 이동되어야 한다. 즉, 오일샌드가 회수되는 과정은 두 가지 조건이 필요하다. 1) 비튜멘이 유동성을 갖춰야 하며, 2) 유동성을 갖춘 비튜멘이 생산정까지 운반되어야 한다. 오일샌드 저류층에서 비튜멘을 회수하는 방법으로 흔히 열처리 기법이 이용되며 보통 증기를 주입하여 회수한다. 현재까지 상용화된 기법은 CSS와 SAGD이다.

2.2 CSS (Cyclic Steam Stimulation) 공법

CSS 공법은 저류층 두께에 따라 수직정과 수평정을 모두 적용할 수 있으며, 크게 세 가지 단계로 구성된다(Figure 2.1). 우선, 저류층 파쇄(fracture) 압력 이상의 고압으로 증기를 주입한다. 균열을 내어 증기를 주입하는 공정은 증기가 유정 인근의 비튜멘을 밀어내는 현상을 방지하면서 증기를 고루 분포시키는 효과를 얻을 수 있다. 증기가 충분히 주입된 후, 증기의 주입을 멈추고 유정을 닫아 3-6일 정도의 시간동안 증기의 열이 유정 주변으로 고루 전달될 수 있도록 기다린다. 마지막으로, 유정은 생산정으로 전환되어 가열한 비튜멘을 회수한다. 이후 생산효율이 일정수준 이하로 감소하면 위의 과정을 반복하여 비튜멘을 생산한다. 일련의 증기주입 - 생산 과정들을 계속 반복하다가 저류층의 경제성이 일정 이하로 감소할 경우 중단하게 된다. CSS의 장점은 한 개의 유정을 사용한다는 점이다. CSS는 광구의 특성에 따라 수직정, 경사정 그리고 수평정으로 사용될 수 있다.

CSS의 주요 생산 메커니즘은 생산 초기에는 지층 재압밀(formation recompression)과 용해가스 생산 메커니즘이 주를 이루며, 후기에는 중력 배유(gravity drainage)가 주요 역할을 한다. 실제 현장에서 증기 주입 압력은 약 10 MPa로 파쇄 압력보다 약간 높게 유지하며, 생산 압력은 공저 압력을 수백 kPa로 유지하여 생산한다.

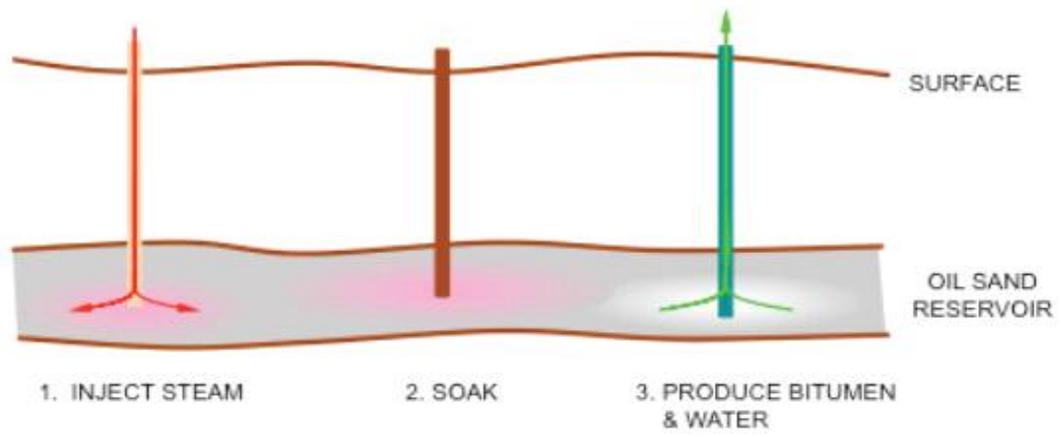


Figure 2.1 CSS (Cyclic Steam Stimulation).

2.3 SAGD (Steam-Assisted Gravity Drainage) 공법

SAGD 공법은 두 개의 수평정으로 구성되어 있으며 하나의 수평정은 다른 수평정의 위에 위치해 있다. 상부의 수평정을 통해 증기가 주입되며 하부의 수평정으로 비튜멘과 응축된 증기가 함께 생산된다(Figure 2.2). 보통 SAGD 공법에서의 증기 주입 압력은 저류층 파쇄 압력보다 낮게 주입된다. SAGD 공법의 주요 생산 메커니즘은 중력 배유이므로 상부의 덮개암(cap rock)이 존재하거나 용해 가스 생산 메커니즘이 약한 저류층에서도 적용 가능하다. 현장에서는 증기 주입 압력을 일정하게 유지하거나 초반 압력을 높게 유지하다 점차 감소시키는 등 압력을 변동시키기도 한다.

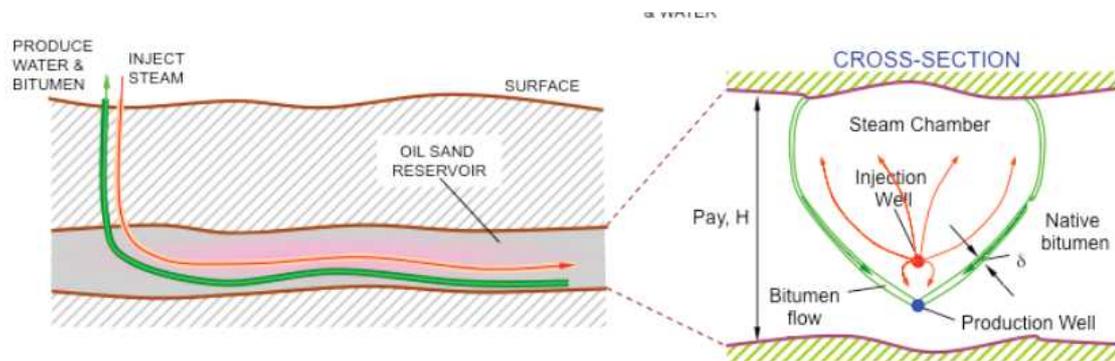


Figure 2.2 SAGD (Steam-Assisted Gravity Drainage).

2.4 기타 용매 주입법

비튜멘의 유동성을 확보하기 위해 주입되는 유체는 보통 증기를 많이 사용하며 그 이외 용매나 기체 등을 이용하기도 한다. Figure 2.3과 Table 2.1은 용매 주입법에 따른 오일샌드 회수 기법을 나타낸 것이다.

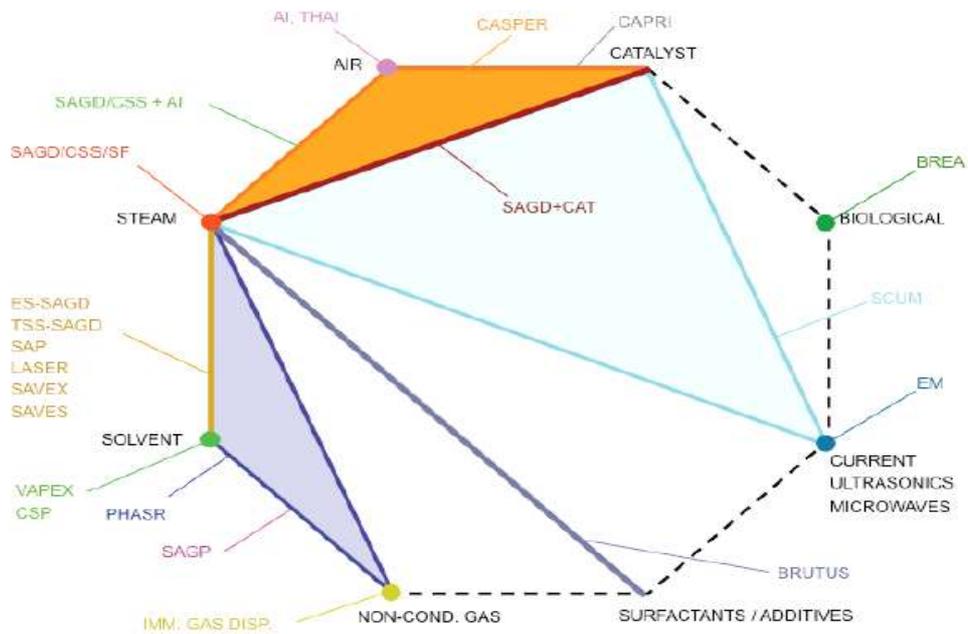


Figure 2.3 The process octagon : agents for bitumen mobilization and processes found in the patent and literature. (Ian D. Gates, 2011)

Table 2.1 The process of oilsands recovery

AI	Air Injection
BREA	Biological Recovery of Energy Assets
BRUTUS	Bulk Reservoir Upgrading Technology for Unconventional Systems
CASPER	Catalytic Air Steam Process for Enhanced Recovery
CAPRI	THAI with Catalyst bed Surrounding the Production well
COGD	Combustion Overhead Gravity Drainage
CSP	Cyclic Solvent Process
CSS	Cyclic Steam Stimulation
EM	Electromagnetic
ES-SAGD	Expanding Solvent Steam Assisted Gravity Drainage
LASER	Liquid Addition to Steam for Enhanced Recovery (solvent-assisted cyclic steam stimulation)
PHASR	Phased Steam Solvent Recovery
SAGD	Steam-Assisted Gravity Drainage
SAGP	Steam and Gas Push
SAP	Solvent Aided Process (essentially the same as ES-SAGD)
SAS	Steam Alternating Solvent
SAVEX	Steam Assisted Solvent Extraction
SAVES	Solvent Assisted Vapor Extraction

SCUM	Steam and Catalyst for Upgrading with Microwaves
THAI	Toe-to-Heel Air Injection
TSS-SAGD	Tapered Steam and Solvent Steam-Assisted Gravity Drainage
VAPEX	Vapor Extraction

2.5 웨지정 공법

웨지정(wedge well) 공법은 두 쌍의 SAGD 유정 사이에 추가정을 시추하여 잔류 오일을 회수하는 기법으로, 두 개의 SAGD 유정 사이에 있는 잔류 오일을 회수할 수 있고 SAGD 증기챔버의 확장 속도를 증진시킴으로써 비튜멘의 회수효율을 극대화할 수 있다는 장점을 갖는다. 이 기법은 Cenovus Energy사에서 개발되었으며 Foster Creek 프로젝트에서 상업성이 입증되었다.

이 기법은 Cyr et al.(2001)와 Arthur et al.(2009) 등에 의해 연구가 진행되었으며 현재 특허가 출원된 상태이다. Cyr et al.(2001)은 SAGD 유정 근처에 CSS 유정을 시추하여 회수율을 높이는 방법을 제안하였다. Arthur et al.(2009)은 두 개의 SAGD 유정 사이에 추가정을 시추하여 간헐적으로 증기를 주입하고 생산하는 방법을 제안하였으며 두 개의 SAGD 유정 사이의 유체교환이 생길 때 추가정을 설치할 경우 회수율이 높아질 수 있음을 보였다. Figure 2.4는 두 개의 SAGD 유정과 웨지정의 모식도를 나타낸다. 일반적인 웨지정 공법은 SAGD 공법과 CSS 공법을 합친 개념으로 추가정을 CSS와 같은 방식으로 운영한다. 웨지정 공법은 여러 개의 SAGD 유정을 시추하기 어려울 때 효과적으로 이용할 수 있으며, SAGD 유정 사이의 잔류 비튜멘을 회수하고 증기챔버의 확장을 증진시켜 열효율을 높일 수 있다.

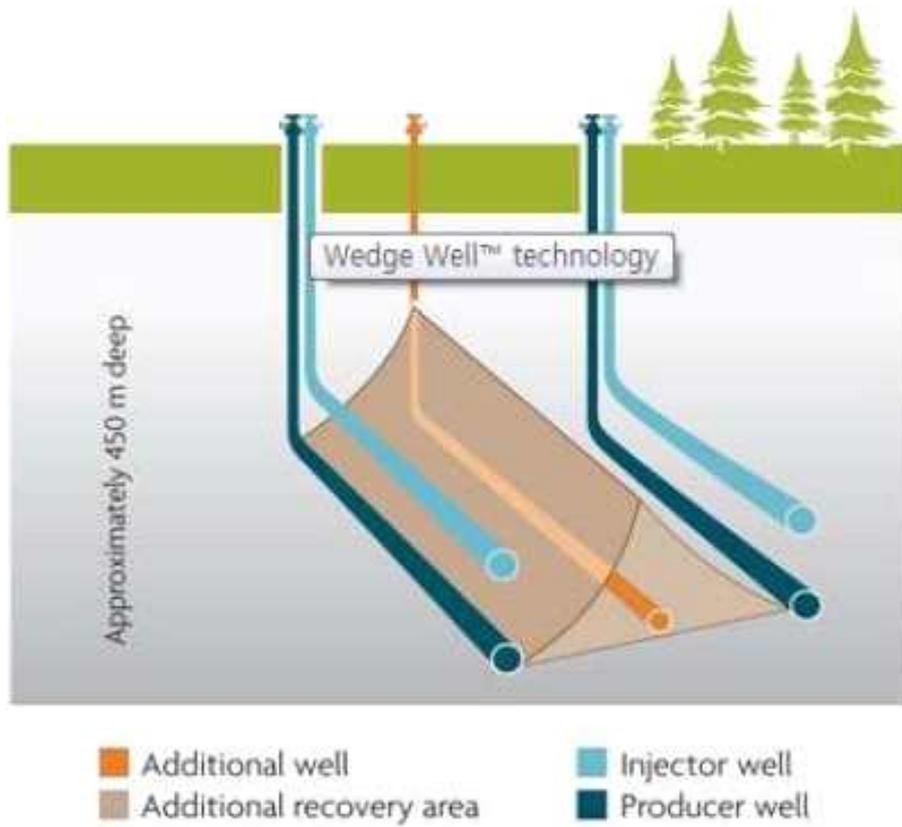


Figure 2.4 SAGD wells and wedge well.

2.6 인공신경망

인간의 두뇌는 많은 세포들과 이를 상호 연결하는 신경으로 구성되며, 약 10^{11} 억 개의 뉴런과 각각 1만개 정도의 시냅스를 통하여 다른 세포들과 신호를 서로 주고받는다. 인간의 사고는 이와 같은 뉴런들의 동시다발적인 병렬 처리에 의해 이루어진다(Rumelhart and McClelland, 1986). Figure 2.5는 생물학적 신경세포의 구조를 나타낸다. 생물학적 신경 세포는 세포체(cell body), 시냅스(synapse), 축색돌기(axon), 수상돌기(dendrite)로 구성되어 있다. 신경세포는 다른 신경세포들로부터 전기, 화학적 신호를 시냅스를 통해 받아들인 후 종합하여 이 값이 한계치보다 커지게 되면 다른 신경세포에 출력을 전달한다. 신경 세포 내의 정보 전달은 전기적 펄스에 의해 이루어지며, 시냅스 사이의 정보 전달은 화학물질에 의해 이루어진다(한학용, 2005).

인공 신경망은 이러한 생물학적 신경세포들 간의 정보처리와 전달과정을 모방하여 다량의 계산요소들이 병행적으로 계산을 수행할 수 있게 한다. Figure 2.6은 인공신경망의 구조를 나타내며, 노드(node) 또는 처리요소(Processing Element, PE)라고 하는 다수의 뉴런들이 층 구조로 복잡하게 연결된 망으로 이루어진다. Table 2.2는 생물학적 신경망과 인공신경망을 비교하고 있다. 인공신경망은 생물학적 신경세포에서 수상돌기를 입력 유닛으로 설정하고, 가중치의 합은 각 유닛과 연결된 가중치의 곱의 합으로 계산하며 이것이 활성화 함수에 의해 출력 값으로 산출하도록 모델링되었다.

세포체의 기능인 가중치 합은 활성화 함수를 통하여 구현된다. 가장 널리 쓰이는 활성화 함수는 식 (2.1)의 시그모이드(sigmoid) 함수가 사용된다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (2.1)$$

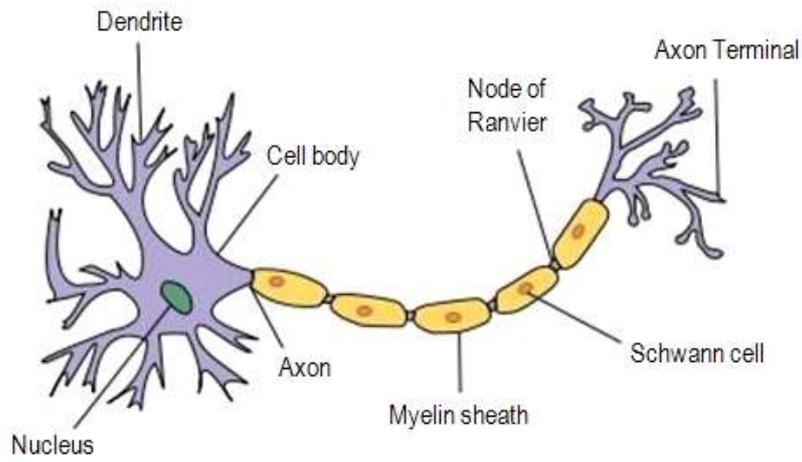


Figure 2.5 Schematic diagram of a biological neuron.

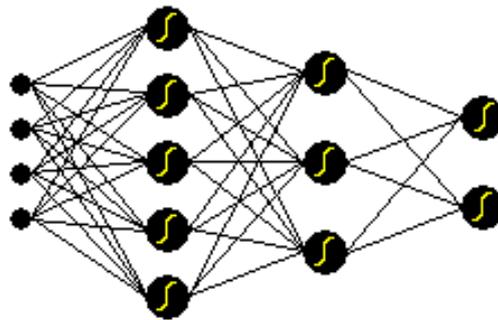


Figure 2.6 Schematic diagram of an artificial neural network.

Table 2.2 Comparison of BNN and ANN

Biological Neural Network	Artificial Neural Network
Neuron	Processing elements
Dendrites	Input layer
Soma - Integration of excitatory / inhibitory fashioned neuron	Weighted sum
Axon - Fire(over threshold)	Activation function → output
Synapse	Interconnections
Electrochemical pulses	Connection weight

인공신경망의 학습 원리는 입력 및 출력 환경에 따라 일정한 규칙에 의해 연결 가중치를 조절하는 것, 즉 주어진 정보에 따라 자신의 정보처리 상태를 변경시키는 것이며 인공신경망의 가장 큰 장점이다. 뉴런 간 연결 강도는 인공신경망의 예측성능에 결정적 역할을 하며 학습과정 동안 실제 계산값과 예측값의 오차를 합산하여 총 오차를 계산한다. 총 오차는 정해진 학습 횟수만큼 학습이 수행된 후 계산될 수 있다.

인공신경망은 석유공학 분야에서 시추, 유정완결, 검층, 지층 평가, 저류층 공학, 생산 설계, 생산 최적화 등 다양한 분야에 패턴/클러스터 분석, 신호 및 이미지 처리, 시스템 제어, 예측 및 상관관계분석, 최적화 목적으로 활용되고 있다(Saputelli et al., 2002).

3. 증기챔버의 발달 양상의 감지를 위한 인자 개발

3.1 기존 SAGD 공법 시뮬레이션

SAGD 증기챔버의 발달 양상을 확인할 수 있는 인자를 개발하기 위해 가장 간단한 모델인 2차원 균질 저류층에 대해 SAGD 시뮬레이션을 수행하였다. 저류층 전산모델은 CMG사에서 개발한 STARS™를 사용하였다. 시뮬레이션 기간은 총 18년으로 설정하였다. Figure 3.1은 대상 저류층을 나타내며 Table 3.1은 대상 저류층의 물성을 나타낸다. 대상 저류층은 1×50×20의 사각 격자 시스템이며 격자의 크기는 2m×2m×2m이다. 즉, 오일샌드 저류층의 두께는 40 m로 폭은 100 m인 모델이다.

저류층의 평균 유체투과율과 수직-수평 유체투과율 비는 캐나다 Athabasca 지역 B 광구 자료를 이용해 각각 2,500 md와 0.5로 설정하였다. Table 3.2는 SAGD 시뮬레이션의 운영 조건을 나타낸다. 주입정의 운영조건으로 최대 증기 주입 압력은 3,500 kPa, 일일 증기 주입량은 10 m³으로 설정하였다. 생산정의 운영조건은 생산 압력은 3,000 kPa로 설정하였으며 증기가 직접 생산되는 것을 방지하기 위해 일일 최대 증기 생산량을 0.1 m³으로 설정하였다. 또한 비튜멘과 응축된 물의 생산량을 고려하여 일일 최대 유체 생산량을 20 m³으로 두었다.

Figure 3.2는 전체 저류층의 누적 증기-오일비로 A 시점(2014년)은 누적 증기-오일비가 급격히 증가하다가 완만하게 하강하는 시점으로 두 개의 증기챔버의 영향 반경이 합쳐지는 구간을 의미한다. A 시점은 유정 시스템의 증기챔버가 서로 만나 주입한 증기가 영향을 끼치는 반경이 증가하여 에너지효율

의 증가폭이 감소한 시점이다. B 시점(2024년)은 누적 증기-오일비가 다시 급격히 증가하는 시점으로 증기챔버가 비유동 경계에 도달하여 비튜멘 생산량이 급감하는 시점이다(강원대학교 기술보고서).

A 시점이 두 증기챔버의 영향 반경이 합쳐지는 시점임을 증명하기 위해 저류층의 압력 단면을 Figure 3.3에 나타내었다. SAGD는 주입정에서 증기를 주입하여 증기챔버를 발달시키고, 증기에 의해 녹은 비튜멘은 생산정으로 생산된다. 그러므로 증기챔버의 영향 반경은 바로 생산된 비튜멘에 의해 압력이 낮아지는 지역을 의미한다. 2014년인 A 시점에 두 개의 증기챔버의 영향 반경이 합쳐지는 것을 확인할 수 있다.

B 시점이 증기챔버가 비유동 경계에 도달하는 시점임을 증명하기 위해 저류층의 온도 단면을 Figure 3.4에 나타내었다. 2024년에 왼쪽 유정의 증기챔버가 왼쪽 저류층 경계에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3.1 Reservoir properties of SAGD model

Reservoir properties	Value
Grid System	I x J x K = 1(2m) x 50(2m) x 20(2m)
Porosity (unitless)	0.23
Horizontal permeability (md)	2,500
Vertical permeability (md)	1,250
Initial oil saturation (unitless)	0.85
Initial reservoir temperature (°C)	15.5 @ surface
Initial reservoir pressure (kPa)	2700 @ reservoir top
Steam temperature (°C)	235

Table 3.2 Well constraints of SAGD model

Well constraints	
<i>injector</i>	
BHP (Bottom hole pressure)	: MAX 3,500 kPa
STW (Surface water rate)	: MAX 10 m ³ /d
<i>producer</i>	
BHP (Bottom hole pressure)	: MIN 3,000 kPa
STEAM (Steam rate)	: MAX 0.1 m ³ /d
STL (Surface liquid rate)	: MAX 20 m ³ /d

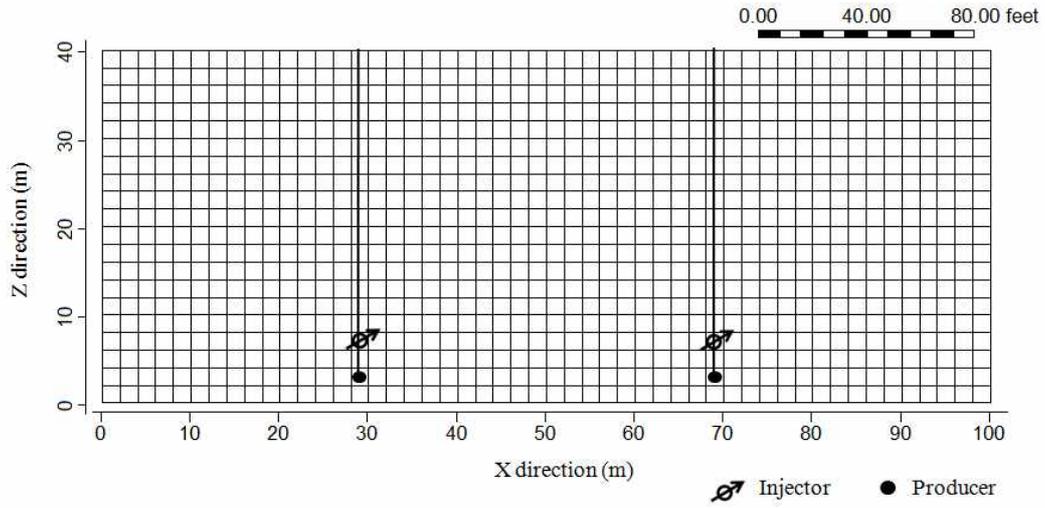


Figure 3.1 Schematic diagram of SAGD model.

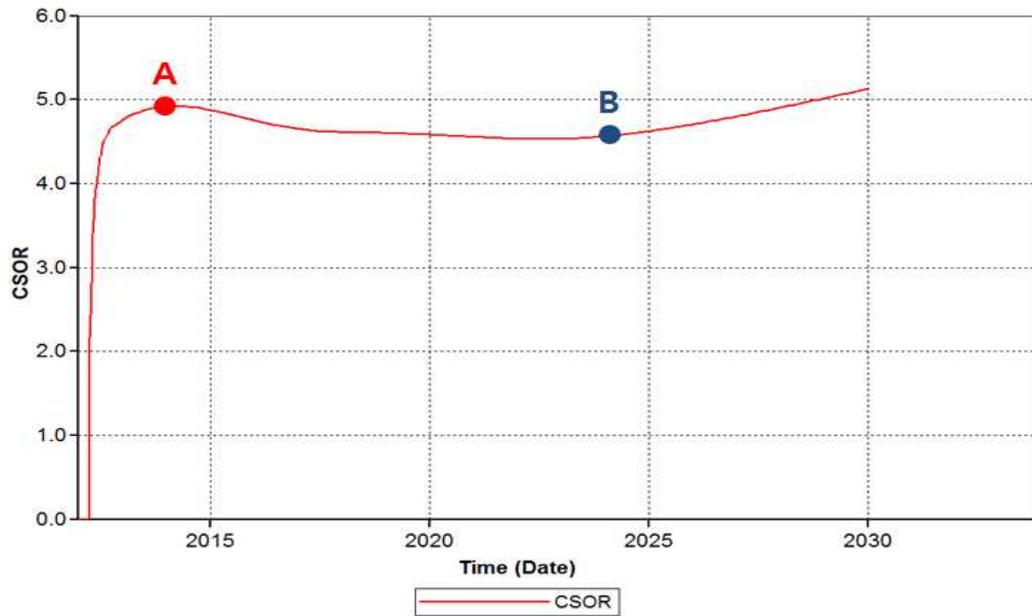


Figure 3.2 Cumulative steam oil ratio of SAGD model.

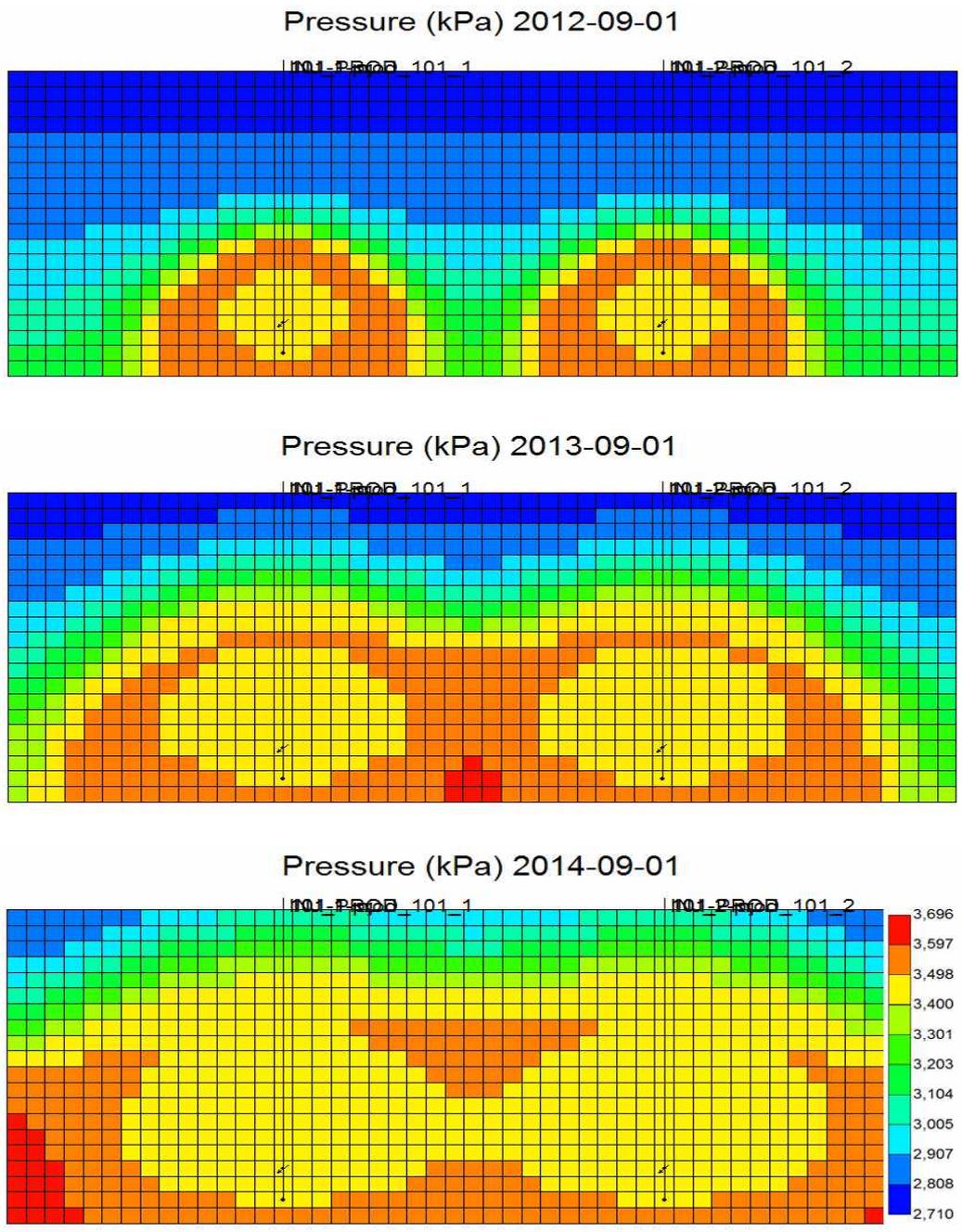


Figure 3.3 Cross section of reservoir pressure.

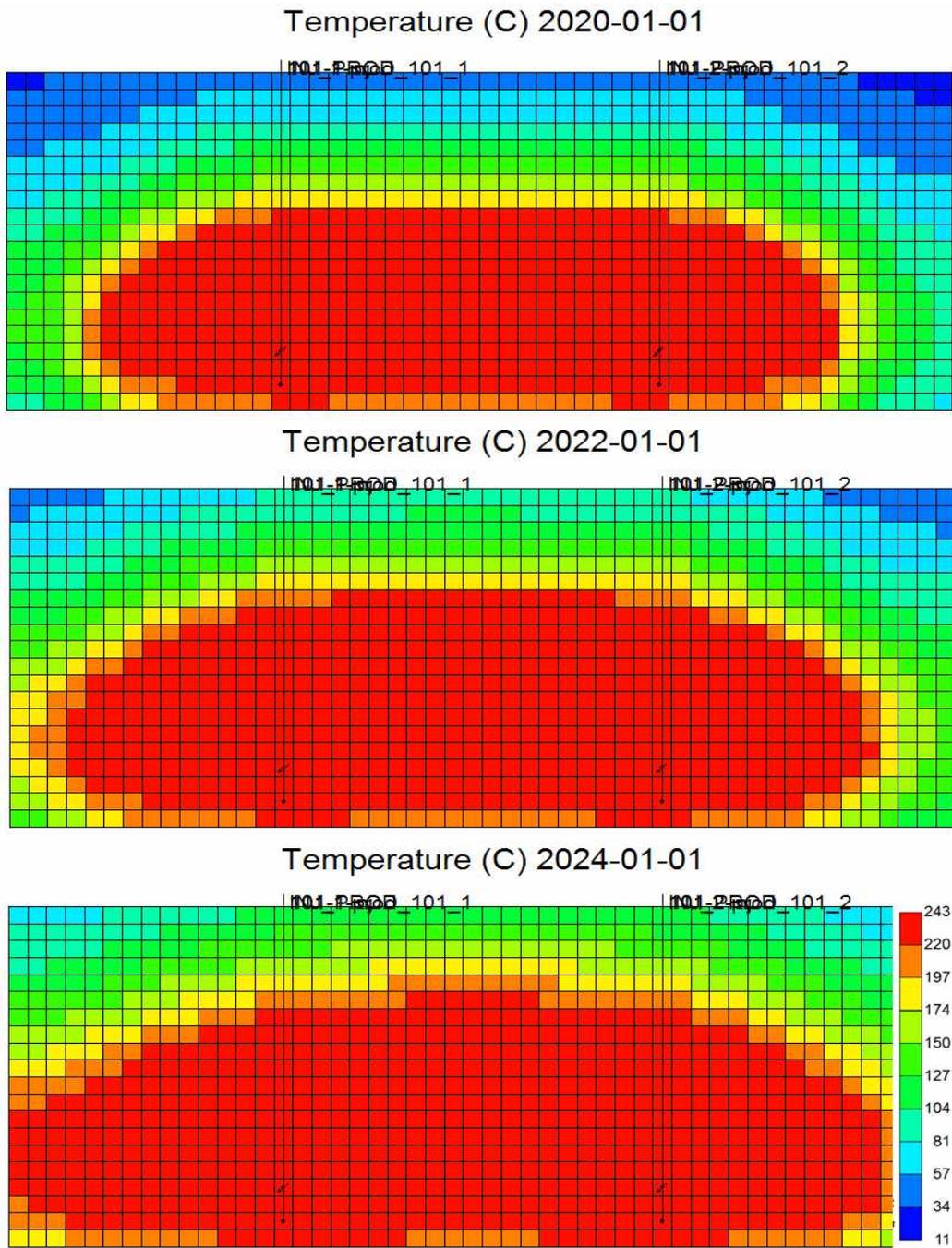


Figure 3.4 Cross section of reservoir temperature.

3.2 웨지정 공법 시물레이션

웨지정 공법 적용시 증기챔버의 발달 양상을 확인할 수 있는 인자를 개발하기 위해 SAGD와 마찬가지로 2차원 균질 저류층에서 시물레이션을 수행하였다. 저류층 모델과 물성치는 SAGD 모델과 동일하다.

Figure 3.5는 웨지정 공법을 위한 저류층 모델이며 Table 3.3은 웨지정 공법 시물레이션의 운영 조건을 나타낸다. SAGD 주입정과 생산정의 운영 조건은 ‘3.1 SAGD 공법 시물레이션’과 동일하며 웨지정의 운영 조건은 기본적으로 증기 주입과 비튜멘 생산을 반복한다. 증기 주입기간의 운영조건은 최대 증기 주입압력은 5,000 kPa, 일일 최대 증기 주입량은 40 m³으로 설정하였다. 비튜멘 생산기간의 운영조건은 SAGD 생산정의 운영조건과 동일하게 두었다.

SAGD 공법 시물레이션 결과 2014년에 두 개의 증기챔버의 영향반경이 합쳐지는 것을 확인하였다. 웨지정의 개시 시점에 따른 증기챔버 발달 양상을 살펴보기 위해 증기챔버의 영향반경이 합쳐지기 전에 웨지정을 개시하는 경우인 ‘Wedge - B’ (before)와 합쳐진 후에 개시하는 경우 ‘Wedge - A’ (after)로 나누어 시물레이션을 수행하였다.

Figure 3.6은 ‘Wedge - B’ 모델의 저류층 전체(a)와 각 유정(b)의 누적 증기-오일비로 A 시점(2013년)은 두 개의 SAGD 증기챔버와 웨지정의 증기챔버, 총 3개의 증기챔버가 합쳐지는 시점이다. 증기챔버 영향반경이 합쳐지는 시점이 SAGD만 이용할 경우보다 1년 정도 빨라진 것을 확인할 수 있다. 즉, 웨지정은 증기챔버의 성장을 촉진시킬 수 있음을 의미한다.

B 시점은 앞의 SAGD 시물레이션과 마찬가지로 증기챔버가 비유동 경계에 도달하는 시점이다. SAGD 공법만을 이용한 경우에 비해 웨지정을 이용할

경우 증기챔버가 비유동 경계에 닿는 시점이 4년 정도 앞당겨짐을 확인할 수 있다. 이 역시 웨지정이 증기챔버의 성장을 증진시켰다는 증거가 된다. C 시점은 웨지정의 개시 시점을 의미한다. ‘Wedge - B’ 모델의 경우 웨지정을 개시하자마자 세 개의 증기챔버가 한꺼번에 만나기 때문에 A 시점과 C 시점이 동일하다. 일반적으로 CSS로 운영되는 웨지정의 증기 주입압력이 SAGD보다 높기 때문에 A(C)시점에서 증기 주입이 멈추게 된다. 이는 Figure 3.7에서 확인할 수 있다. 웨지정이 개시되는 순간 SAGD 주입정에서의 증기 주입이 멈추는 것을 확인할 수 있다.

또한 웨지정과 SAGD 증기챔버의 상호 간섭효과는 Figure 3.6 (b)의 각 유정의 누적 증기-오일비를 통해 확인할 수 있다. 일반적으로 웨지정의 증기 주입압력이 SAGD의 경우보다 크기 때문에 증기는 웨지정에서 SAGD로 유입되게 된다. 이 때 증기를 주입하는 쪽인 웨지정의 누적 증기-오일비는 증가하게 되며 증기가 유입되는 쪽인 SAGD는 증기의 주입이 감소하기 때문에 누적 증기-오일비는 감소하게 된다. 즉, 각 유정의 누적 증기-오일비 그래프를 통해 유정 간 증기 주입 방향을 유추할 수 있다.

결론적으로 증기챔버 발달 양상을 감지할 수 있는 인자는 다음과 같다.

1) 전체 저류층 누적 증기-오일비

- 급격히 증가하다가 감소하는 시점 (A 시점)
: 두 개의 SAGD 증기챔버의 영향 반경이 만나는 시점
- 감소하다가 다시 증가하는 시점 (B 시점)
: 합쳐진 증기챔버가 비유동 경계에 도달하는 시점
- 톱니 모양처럼 일시적으로 증가/감소하는 모양 (C 시점)
: 웨지정에서 증기 주입 기간 (누적 증기-오일비 증가)
: 웨지정에서 비튜멘 생산 기간 (누적 증기-오일비 감소)

2) 각 유정의 누적 증기-오일비

유정 간 증기의 흐름 방향을 알 수 있음

- 누적 증기-오일비가 증가하는 유정
: 다른 유정으로 증기를 유입하는 유정
- 누적 증기-오일비가 감소하는 유정
: 다른 유정에서 증기가 유입되는 유정

3) 각 유정의 증기 주입량

웨지정과 SAGD 유정의 증기 간섭 효과를 직접적으로 확인 가능

- SAGD의 증기 주입이 감소 또는 중지
: 웨지정으로부터 높은 압력의 증기가 주입

Table 3.3 Well constraints of wedge well model

Well constraints	
<i>injector</i>	
BHP (Bottom hole pressure)	: MAX 3,500 kPa
STW (Surface water rate)	: MAX 10 m ³ /d
<i>producer</i>	
BHP (Bottom hole pressure)	: MIN 3,000 kPa
STEAM (Steam rate)	: MAX 0.1 m ³ /d
STL (Surface liquid rate)	: MAX 20 m ³ /d
<i>Wedge well (Injection time)</i>	
BHP (Bottom hole pressure)	: MAX 5,000 kPa
STW (Surface water rate)	: MAX 40 m ³ /d
<i>Wedge well (Production time)</i>	
BHP (Bottom hole pressure)	: MIN 3,000 kPa
STEAM (Steam rate)	: MAX 0.1 m ³ /d
STL (Surface liquid rate)	: MAX 20 m ³ /d

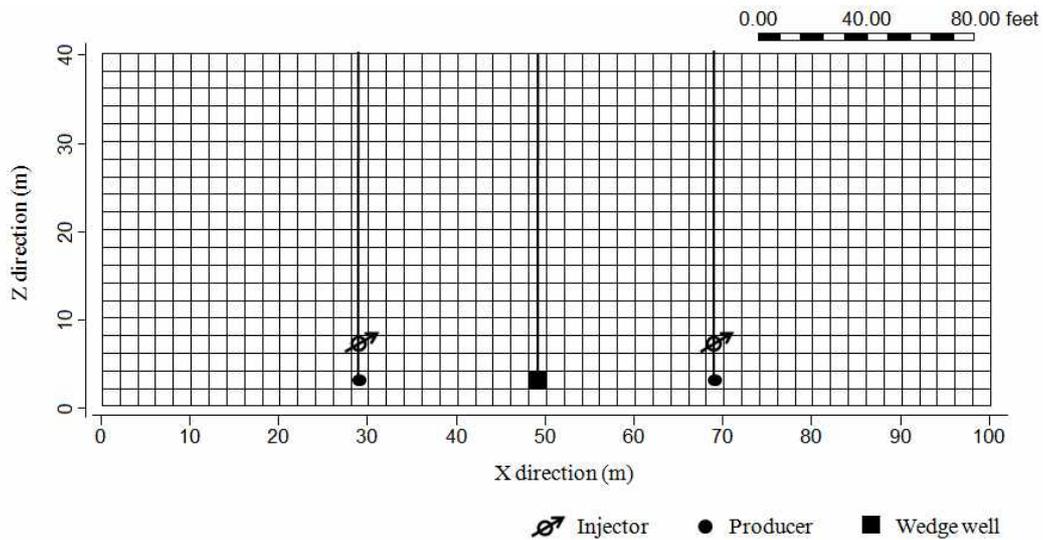
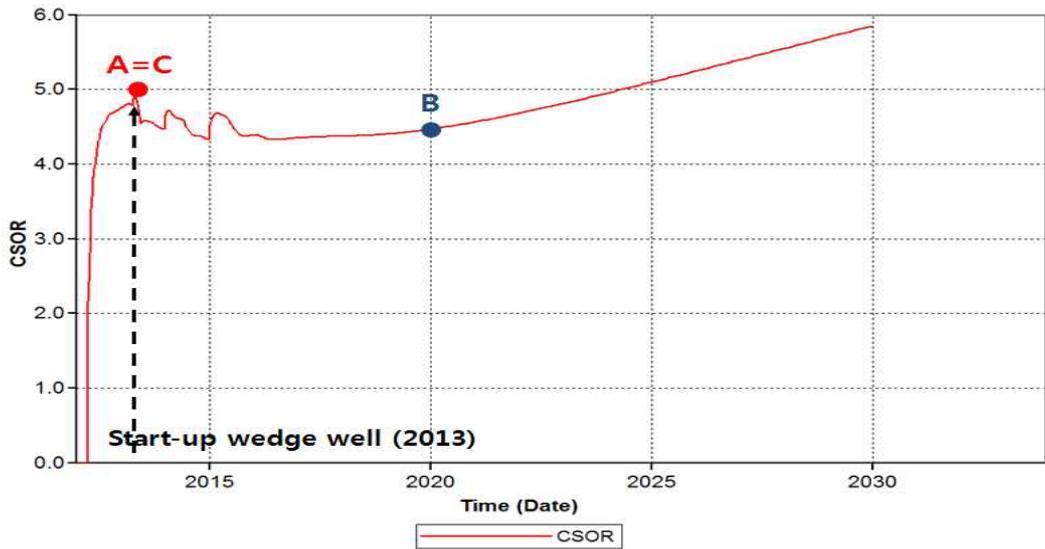
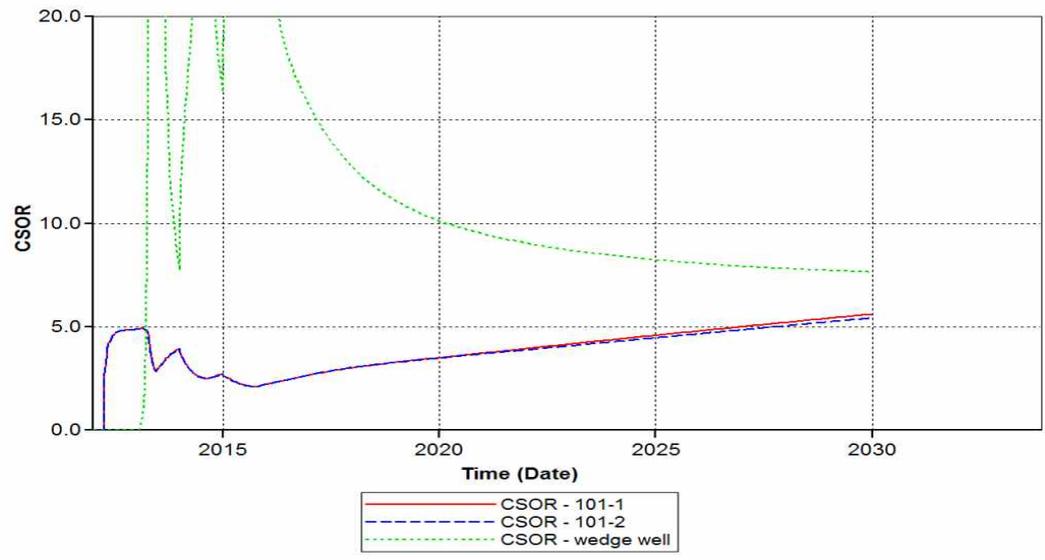


Figure 3.5 Schematic diagram of wedge well model.



(a)



(b)

**Figure 3.6 Cumulative steam oil ratio of ‘Wedge – B’ Model
(a) total field (b) each well pair.**

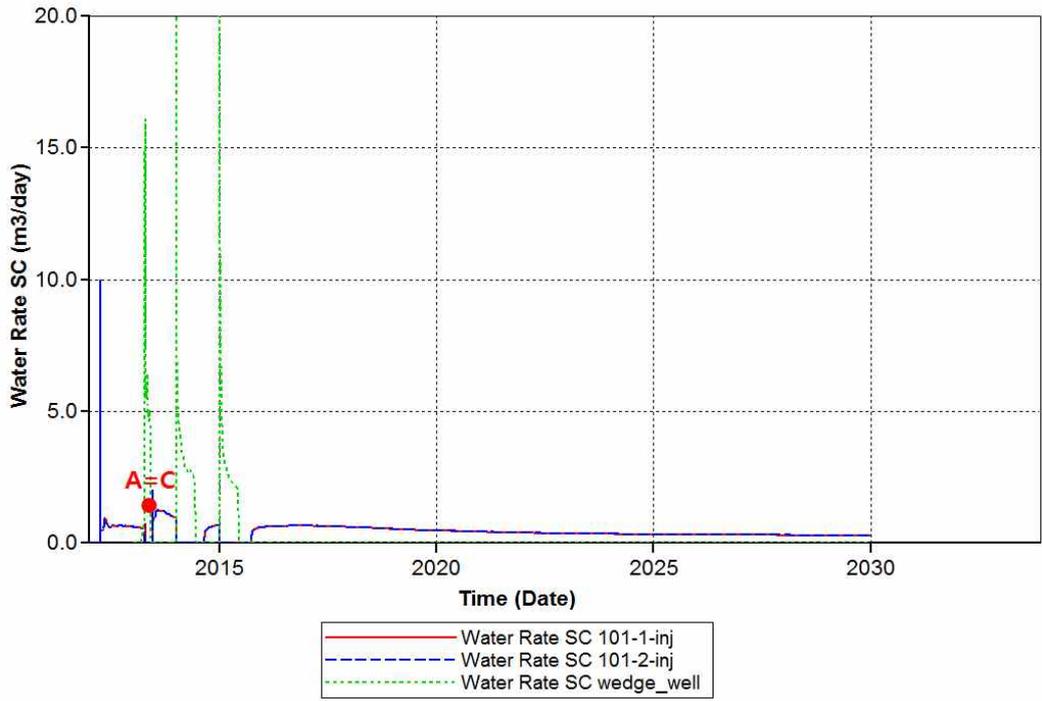
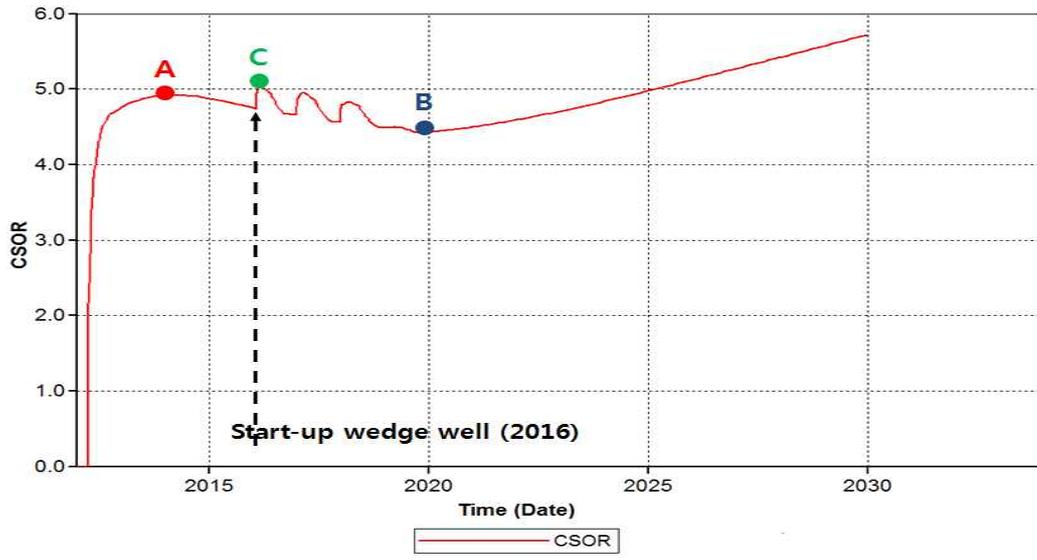


Figure 3.7 Steam injection rate of each well pair(Wedge – B).

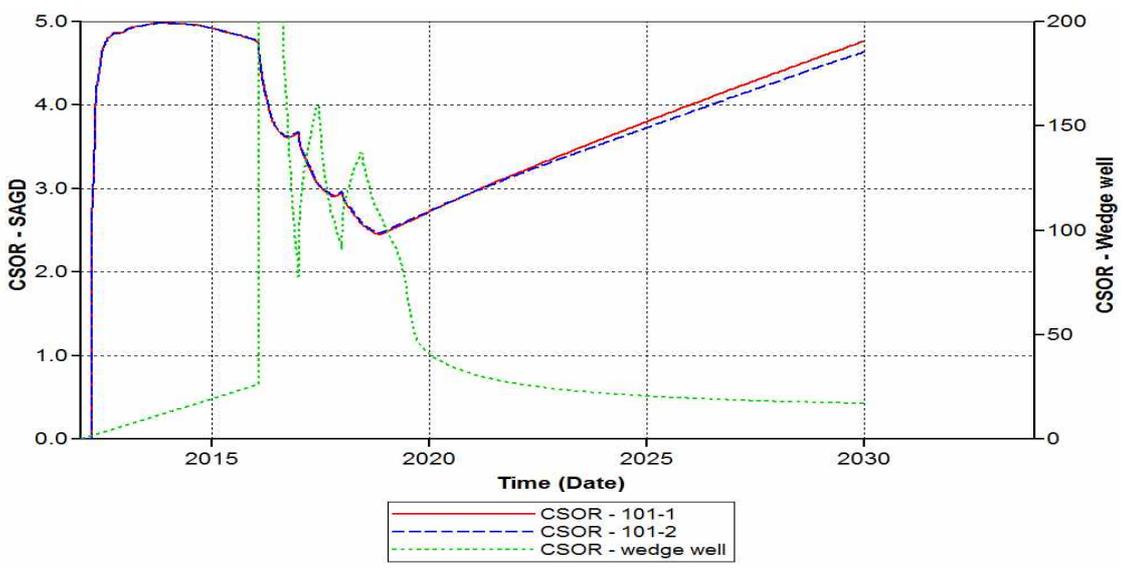
Figure 3.8은 ‘Wedge - A’ 모델의 저류층 전체(a)와 각 유정(b)의 누적 증기-오일비로 A 시점(2014년)은 두 개의 SAGD 증기챔버의 영향 반경이 합쳐지는 시점이다. 증기챔버의 영향 반경이 합쳐진 후 웨지정을 시추했기 때문에 A 시점은 SAGD의 경우와 같다.

B 시점은 앞의 SAGD 시물레이션과 마찬가지로 증기챔버가 비유동 경계에 도달하는 시점이다. SAGD 공법만을 이용한 경우에 비해 웨지정을 이용한 경우 증기챔버가 비유동 경계에 닿는 시점이 4년 정도 앞당겨짐을 확인할 수 있다. 즉 웨지정이 증기챔버의 성장을 증진시켰음을 알 수 있다. C 시점은 웨지정의 개시 시점을 의미한다. ‘Wedge - B’ 모델의 경우 웨지정을 개시하자마자 세 개의 증기챔버가 한꺼번에 만나기 때문에 A 시점과 C 시점이 동일했다. 그러나 ‘Wedge - A’ 모델의 경우 우선 SAGD 증기챔버가 합쳐진 이후에 웨지정을 개시했기 때문에 A 시점과 C 시점이 다르다. ‘Wedge - B’ 모델과 같이 웨지정의 가동은 누적 증기-오일비가 톱니바퀴 모양을 띄게 한다. 이전에 언급했듯이 CSS로 운영되는 웨지정의 증기 주입압력이 SAGD보다 높기 때문에 C시점에서 증기 주입이 멈추게 된다. 이는 Figure 3.9에서 확인할 수 있다. 웨지정이 개시되는 순간(C 시점) SAGD 주입정에서의 증기 주입이 멈추는 것을 확인할 수 있다.

또한 웨지정과 SAGD 증기챔버의 상호 간섭효과는 Figure 3.8 (b)의 각 유정의 누적 증기-오일비를 통해 확인할 수 있다. 앞에서 언급했듯이 증기를 주입하는 쪽인 웨지정의 누적 증기-오일비는 증가하게 되며 증기가 유입되는 쪽인 SAGD는 증기의 주입이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 각 유정의 누적 증기-오일비 그래프를 통해 유정 간 증기 주입 방향을 유추할 수 있다.



(a)



(b)

Figure 3.8 Cumulative steam oil ratio of 'Wedge - A' Model

(a) total field (b) each well pair.

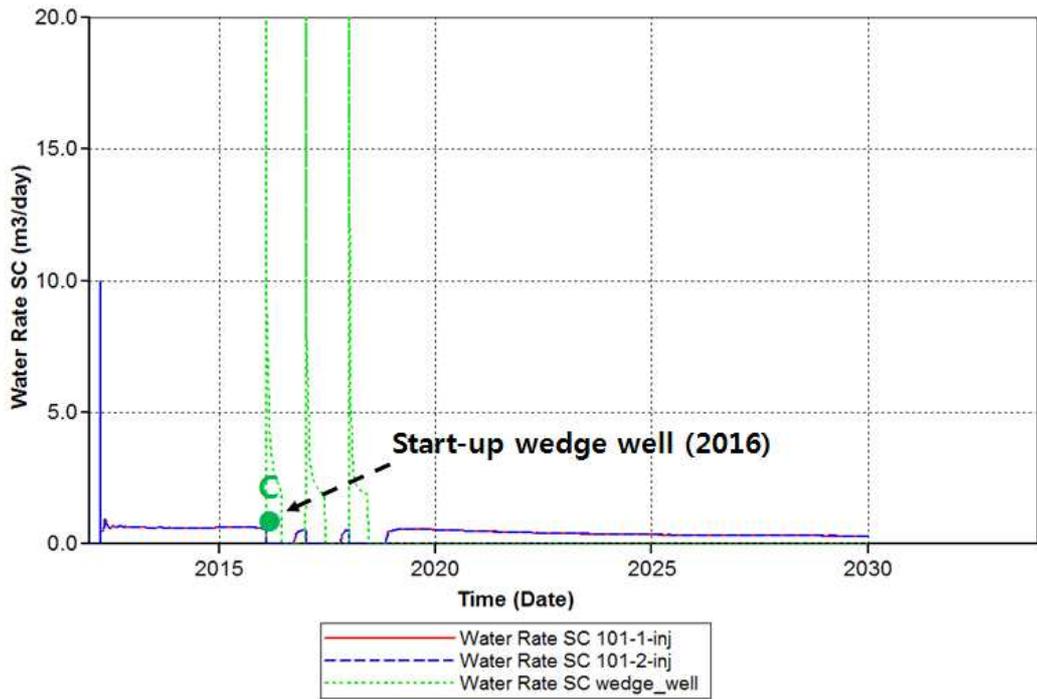


Figure 3.9 Steam injection rate of each well pair(Wedge – A).

3.3 2차원 균질 저류층에서 SAGD와 웨지정 공법간 비교

Figures 3.10 - 3.11은 SAGD, Wedge - B, Wedge - A 모델의 회수율과 누적 증기-오일비를 비교한 것이다. 시뮬레이션 기간을 편의상 2030년까지 설정하였지만 실제 현장에서 SAGD 생산 기간은 10년 내외이다. 현재 모델에서도 생산 기간이 10년 이상으로 넘어갈 경우 누적 증기-오일비가 급격히 증가한다. 그러므로 2022년에 생산을 중지시킨다고 가정하면 그 때의 회수율은 SAGD는 0.56, Wedge - B는 0.69, Wedge - A는 0.66이다. 또한 누적 증기-오일비는 SAGD는 4.53, Wedge - B는 4.68, Wedge - A는 4.59이다(Table 3.4). 결과적으로 웨지정을 이용할 경우 누적 증기-오일비는 비슷한 수준을 유지하면서 회수율은 13% 가량 증진시킬 수 있었다.

또한 2차원 균질 저류층 시뮬레이션에서는 Wedge - B가 Wedge - A보다 효율이 좋은 것으로 드러나 SAGD 증기챔버가 합쳐지기 전에 웨지정을 시추하는 것이 더 효과적임을 알 수 있었다. 이는 기존의 Polikar 등(2000)의 연구 결과와 부합하는 것을 확인하였다.

Table 3.4 Comparison of SAGD, Wedge - A and Wedge - B at 2022

Process	Recovery factor	CSOR
SAGD	0.56	4.53
Wedge - B	0.69	4.68
Wedge - A	0.66	4.59

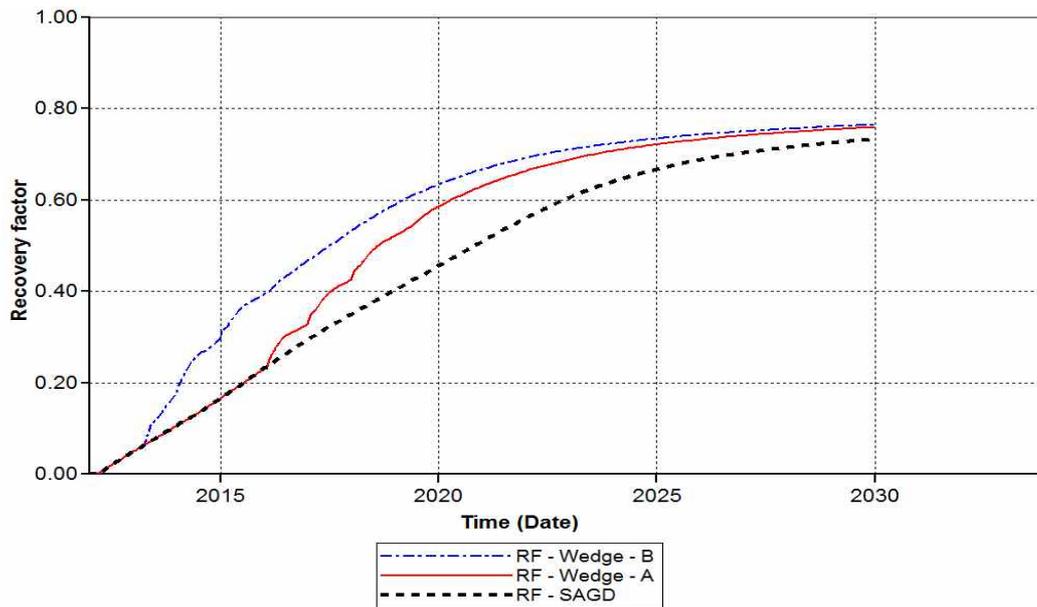


Figure 3.10 Recovery factor of SAGD, Wedge - B and Wedge - A.

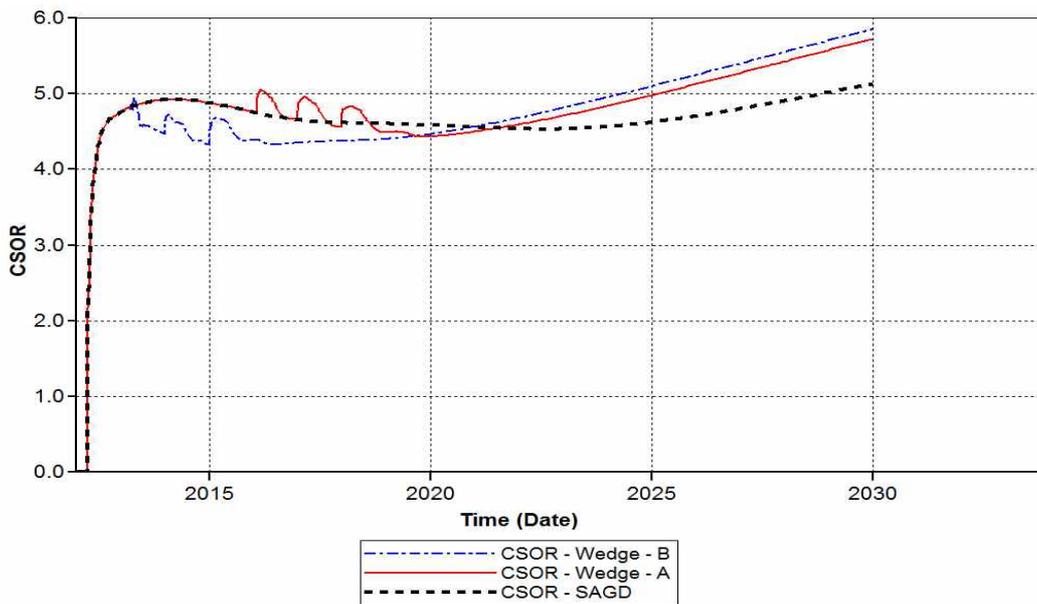


Figure 3.11 Cumulative steam oil ratio of SAGD, Wedge - B and Wedge - A.

4. 저류층 불균질성으로 인한 증기채널링

증기채널링이란 3차원 불균질 저류층에서 나타나는 현상으로 유체투과율이 불균질하여 증기챔버가 불균형적으로 발달하는 것을 의미한다. 대부분의 오일샌드 생산필드에서는 수평정 SAGD 공법을 이용하기 때문에 저류층이 불균질한 경우 수평정을 따라서 발달하는 증기챔버의 모양이 불균형하게 발달한다. Figure 4.1은 증기채널링 현상을 나타내며 증기챔버의 불균질한 발달로 인해 해당 저류층의 heel 부분에 채널링이 발생한 것을 볼 수 있다.

일반적으로 CSS로 운영되는 웨지정의 증기 주입압력이 SAGD의 증기 주입압력보다 높으므로 증기채널링이 발생하는 순간 SAGD의 증기 주입이 중단되게 된다. 만약 SAGD의 증기챔버가 충분히 발달하지 않은 상황에서 증기채널링으로 인해 SAGD의 증기 주입이 중단된다면 오히려 웨지정 공법을 이용하는 것이 더 비효율적일 수 있다. 기존의 대부분 웨지정 연구들이 2차원 균질 저류층에 대해서만 이루어졌기 때문에 증기채널링으로 인한 문제가 발생하지 않았다. 본 연구에서는 웨지정 공법 적용 시 발생한 증기채널링을 감지할 수 있는 인자를 개발하고 증기채널링 발생 후 취해야 할 최적 생산 시나리오를 제안하고자 한다.

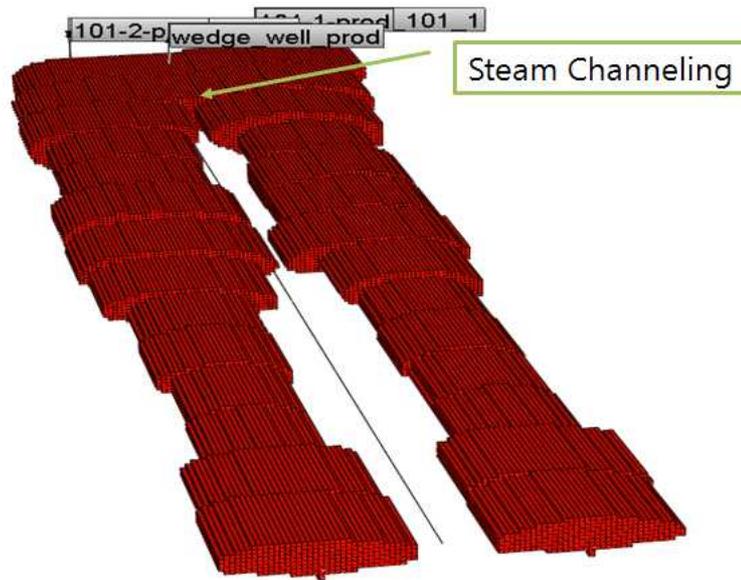


Figure 4.1 Steam Channeling of wedge well model.

4.1 3차원 비균질 저류층 시뮬레이션

웨이징 공법과의 비교를 위해 우선 3차원 비균질 저류층에서 SAGD 공법 시뮬레이션을 수행하였다. Figures 4.2 - 4.3은 대상 저류층을 나타내며 Table 4.1은 대상 저류층의 물성을 나타낸다. 대상 저류층은 10×50×20의 사각격자 시스템이며 격자의 크기는 50m×2m×2m이다.

저류층의 유체투과율은 2차원 모델과 같게 두었으나 증기채널링이 발생하는 저류층 조건을 충족시키기 위해 수평정의 toe 부분의 유체투과율을 10배로 설정했다. Figure 4.2는 저류층의 유체투과율을 나타내며 붉은 부분이 유체투과율이 높은 지역이다. Table 4.2는 SAGD 시뮬레이션의 운영 조건을 나타낸다. 주입정의 운영조건으로 최대 증기 주입 압력은 3,500 kPa, 일일 증기 주입량은 500 m³으로 설정하였다. 생산정의 운영조건은 생산 압력은 3,000 kPa로 설정하였으며 증기가 직접 생산되는 것을 방지하기 위해 일일 최대 증기 생산량을 5 m³으로 설정하였다.

Figure 4.4는 전체 저류층의 누적 증기-오일비로 2차원 모델과 마찬가지로 A 시점(2015년)은 두 개의 증기챔버의 영향 반경이 합쳐지는 구간을 의미한다. B 시점(2019년)은 증기챔버가 비유동 경계에 도달하여 비튜멘 생산량이 급감하는 시점이다. 2030년에 누적 증기-오일비는 3.79이다. Figure 4.5는 SAGD 공법의 회수율로 2030년에 68%이다. 이 모델은 유체투과율이 상당히 좋은 비교적 균질한 저류층이기 때문에 회수율이 높은 편이다. 이 장에서는 시뮬레이션의 단순화를 위해 heel 부분의 유체투과율을 제외한 나머지 부분의 유체투과율을 모두 균질하게 두었다.

Table 4.1 Reservoir properties of 3D heterogeneous model

Reservoir properties	Value
Grid System	I x J x K = 10(50m) x 50(2m) x 20(2m)
Porosity (unitless)	0.23
Horizontal permeability (md)	2,500
High horizontal permeability (md)	25,000
Vertical permeability (md)	1,250
High vertical permeability (md)	12,500
Initial oil saturation (unitless)	0.85
Initial reservoir temperature (°C)	15.5 @ surface
Initial reservoir pressure (kPa)	2700 @ reservoir top
Steam temperature (°C)	235

Table 4.2 Well constraints of SAGD model

Well constraints	
<i>injector</i>	
BHP (Bottom hole pressure) :	MAX 3,500 kPa
STW (Surface water rate) :	MAX 500 m ³ /d
<i>producer</i>	
BHP (Bottom hole pressure) :	MIN 3,000 kPa
STEAM (Steam rate) :	MAX 5 m ³ /d
STL (Surface liquid rate) :	MAX 800 m ³ /d

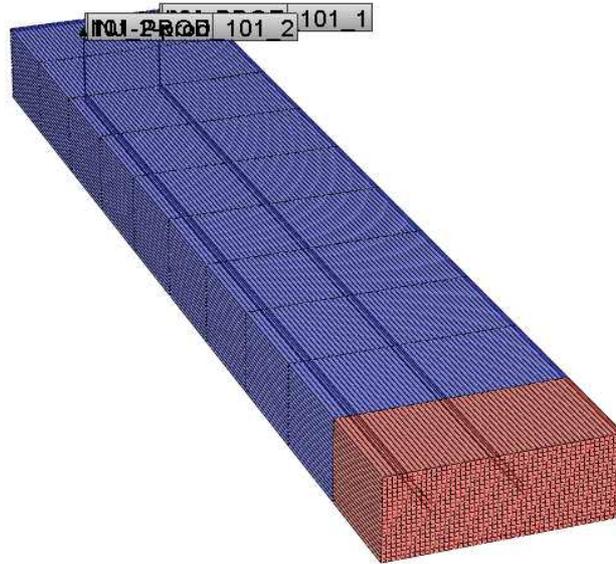


Figure 4.2 3D heterogeneous model.

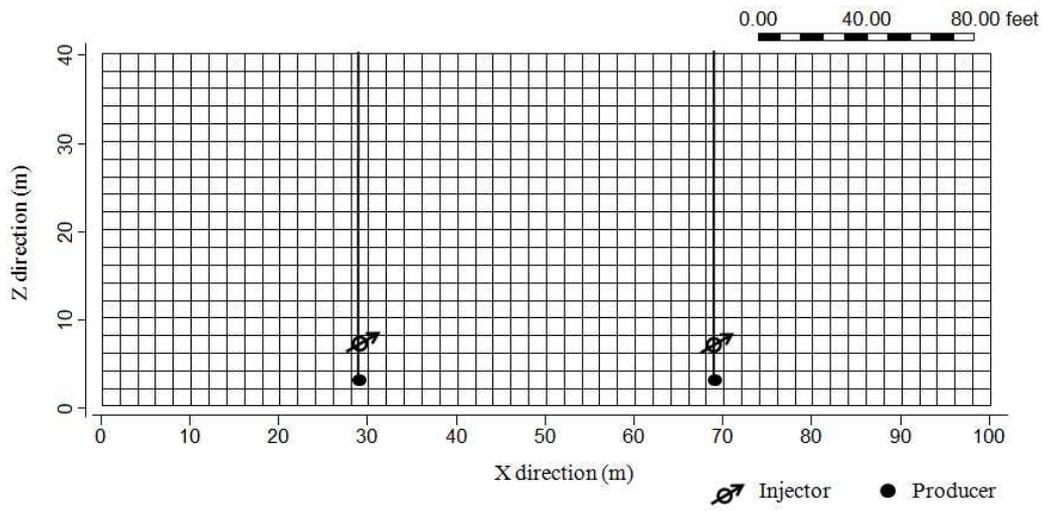


Figure 4.3 Cross section of 3D heterogeneous model.

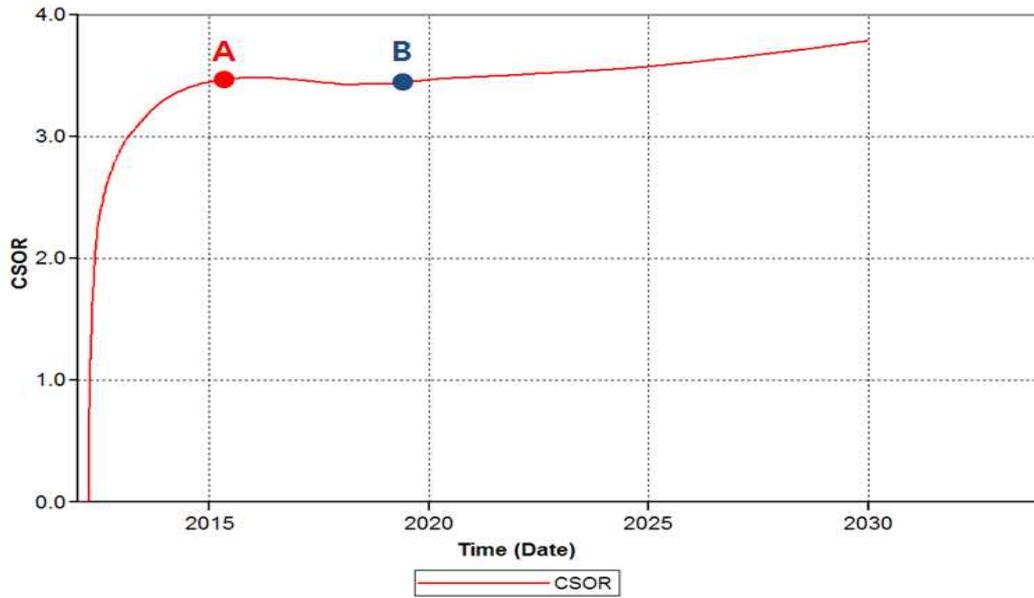


Figure 4.4 Cumulative steam oil ratio of 3D heterogeneous model.

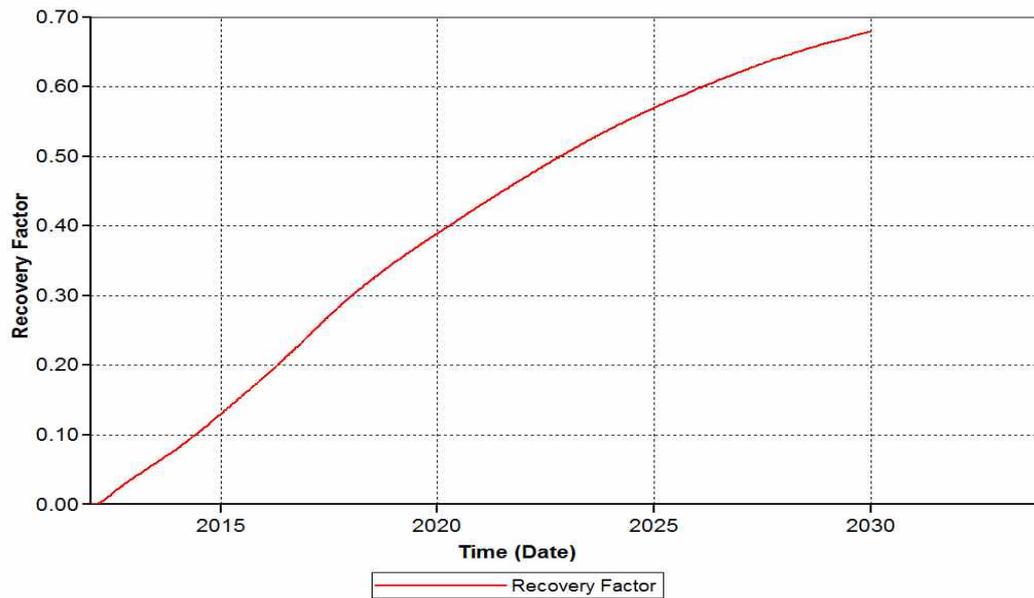


Figure 4.5 Recovery factor of 3D heterogeneous model.

4.2 웨지정 공법 시뮬레이션 및 SAGD와 비교

웨지정 공법 적용시 증기채널링이 미치는 영향을 알아보기 위해 3차원 비균질 저류층에서 웨지정 공법 시뮬레이션을 수행하였다. 저류층 모델과 물성치는 ‘4.1.1 기존 SAGD 공법 시뮬레이션’ 모델과 동일하다. Table 4.3은 웨지정 공법 시뮬레이션의 운영 조건을 나타낸다. SAGD 주입정과 생산정의 운영 조건은 ‘4.1.1 기존 SAGD 공법 시뮬레이션’과 동일하다.

SAGD 공법 시뮬레이션 결과 2015년에 두 개의 증기챔버의 영향반경이 합쳐지는 것을 확인하였다. 웨지정의 개시 시점에 따른 증기챔버 발달 양상을 살펴보기 위해 증기챔버의 영향반경이 합쳐지기 전에 웨지정을 개시하는 경우인 ‘Wedge - B’ (before)와 합쳐진 후에 개시하는 경우 ‘Wedge - A’ (after)를 나누어 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 이 두 가지 결과를 SAGD 공법만 이용할 경우와 비교하였다.

Figure 4.6은 SAGD, ‘Wedge - B’, ‘Wedge - A’ 모델의 증기챔버 발달 양상을 나타낸다. 2차원 균질 저류층 시뮬레이션 경우 ‘Wedge - B’ 모델이 가장 효율이 좋았으며, SAGD의 경우 가장 효율이 좋지 않았다. 하지만 3차원 불균질 저류층의 경우 증기채널링 현상으로 인해 SAGD 주입정에서의 증기 주입이 중지되고 결과적으로 증기챔버의 불균형한 발달을 초래한다. Figure 4.5에서 볼 수 있듯이 증기챔버의 발달 양상 측면에서 SAGD와 ‘Wedge - A’ 모델이 가장 효율적임을 알 수 있다.

‘Wedge - A’ 모델에서도 세분화하여 SAGD 개시부터 4년 후, 8년 후에 웨지정을 시추한 경우를 시뮬레이션 하였다. Figures 4.7 - 4.8은 SAGD, ‘Wedge - B(4yr)’, ‘Wedge - B(8yr)’, ‘Wedge - A’ 모델의 회수율과 누적 증기-오일비

를 나타냈으며 Tables 4.4 - 4.5는 각 모델의 2022년과 2030년의 SAGD, ‘회수율과 누적 증기-오일비를 비교하고 있다.

현재 모델에서도 생산 기간이 10년 이상으로 넘어갈 경우 누적 증기-오일비가 증가한다. 그러므로 2022년에 생산을 중지시킨다고 가정하면 그 때의 회수율은 SAGD는 0.46, Wedge - B는 0.50, Wedge - A (4 yr)는 0.57, Wedge - A (8 yr)은 0.52이다. 또한 누적 증기-오일비는 SAGD는 3.50, Wedge - B는 3.22, Wedge - A (4 yr)는 3.56, Wedge - A (8 yr)은 3.56이다. (Table 4.4). 결과적으로 웨지정을 이용할 경우 누적 증기-오일비는 비슷한 수준을 유지하면서 회수율을 최대 11% 가량 증진시킬 수 있었다.

2030년까지 생산하는 경우에 회수율은 SAGD의 경우 0.67, Wedge - B는 0.66, Wedge - A (4 yr)는 0.66, Wedge - B (8 yr)는 0.70으로 SAGD가 웨지정 모델보다 회수율이 높은 것으로 보이나 비슷한 회수율을 갖는 Wedge - A (4 yr)과의 누적 증기-오일비를 비교하면 0.49 정도 높은 것을 보아 비효율적으로 보인다. 그러므로 3차원 불균질 저류층에서는 Wedge - A가 SAGD나 Wedge - B보다 효율이 좋은 것으로 드러나 SAGD 증기챔버가 합쳐진 후에 웨지정을 시추하는 것이 더 효과적임을 알 수 있었다.

Table 4.3 Well constraints of wedge well model

Well constraints
<i>injector</i>
BHP (Bottom hole pressure) : MAX 3,500 kPa
STW (Surface water rate) : MAX 500 m ³ /d
<i>producer</i>
BHP (Bottom hole pressure) : MIN 3,000 kPa
STEAM (Steam rate) : MAX 5 m ³ /d
STL (Surface liquid rate) : MAX 800 m ³ /d
<i>Wedge well (Injection time)</i>
BHP (Bottom hole pressure) : MAX 5,000 kPa
STW (Surface water rate) : MAX 2,000 m ³ /d
<i>Wedge well (Production time)</i>
BHP (Bottom hole pressure) : MIN 3,000 kPa
STEAM (Steam rate) : MAX 5 m ³ /d
STL (Surface liquid rate) : MAX 800 m ³ /d

Table 4.4 Comparison of SAGD, Wedge – A and Wedge – B at 2022

Process	Recovery factor	CSOR
SAGD	0.46	3.50
Wedge – B	0.50	3.22
Wedge – A (4yr)	0.57	3.56
Wedge – A (8yr)	0.52	3.56

Table 4.5 Comparison of SAGD, Wedge – A and Wedge – B at 2030

Process	Recovery factor	CSOR
SAGD	0.67	3.78
Wedge – B	0.66	3.80
Wedge – A (4yr)	0.66	3.29
Wedge – A (8yr)	0.70	3.64

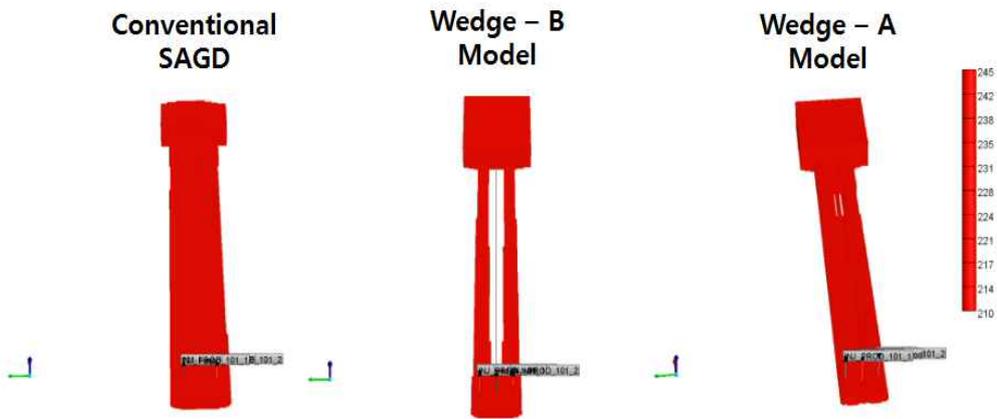


Figure 4.6 Development of steam chamber.

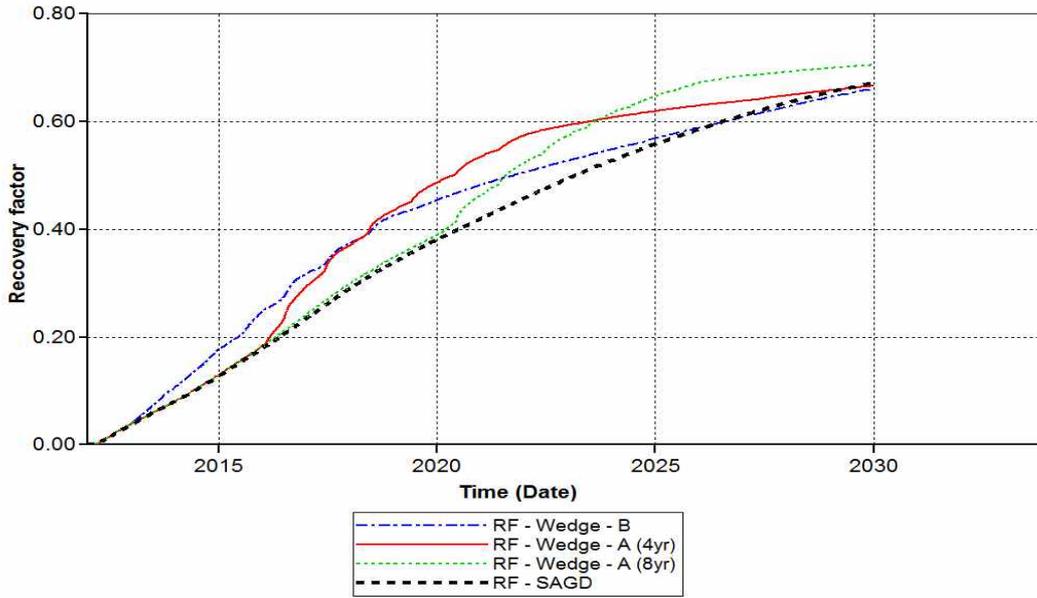


Figure 4.7 Recovery factor of SAGD, Wedge – B and Wedge - A.

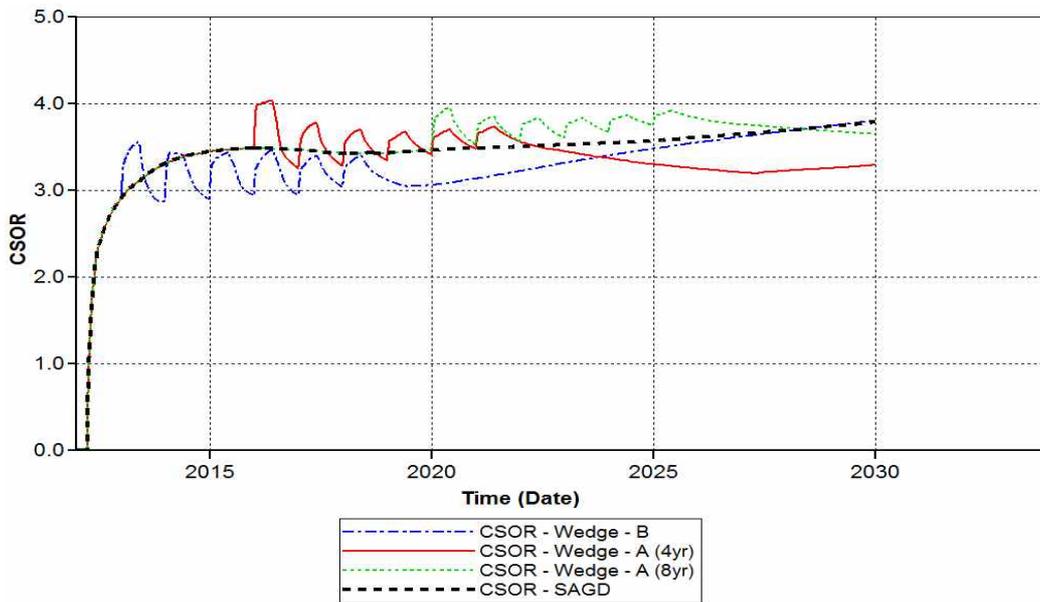


Figure 4.8 Cumulative steam oil ratio of SAGD, Wedge – B and Wedge - A.

5. 인공신경망을 이용한 현장 저류층의 증기 주입압력 최적화

5.1 증기 주입압력 최적화 과정

캐나다 Athabasca 지역 B 광구에 웨지정 공법을 적용하고 인공 신경망으로 증기 주입압력 최적화를 수행하였다. Figure 5.1은 인공신경망을 이용한 주입 시나리오의 최적화 과정을 나타낸 순서도이다. 우선 인공신경망 학습에 사용할 100개의 생산 시나리오를 선정하고 저류층 시뮬레이션을 수행하여 인공신경망에 입력할 증기 주입압력의 범위를 결정한다. 학습 시나리오의 저류층 시뮬레이션 결과를 토대로 인공신경망의 입출력 자료를 얻어 학습시킨다. 학습에 사용하지 않은 검증 시나리오(20 개)의 생산 거동을 인공신경망과 시뮬레이터로 각각 예측하고 그 결과를 비교 분석한다. 인공신경망의 예측 결과가 저류층 시뮬레이션 결과에 비해 충분한 예측성능을 만족하지 못할 경우, 인공신경망의 변수들을 조절하여 예측성능이 수렴할 때까지 인공신경망의 학습과 검증을 반복한다. 학습된 인공신경망의 예측성능이 충분한 예측성능을 보이면, 확인하고자 하는 대다수 생산 시나리오(20만 개)의 생산 거동 예측에 사용하고 최적 생산 시나리오를 선정한다.

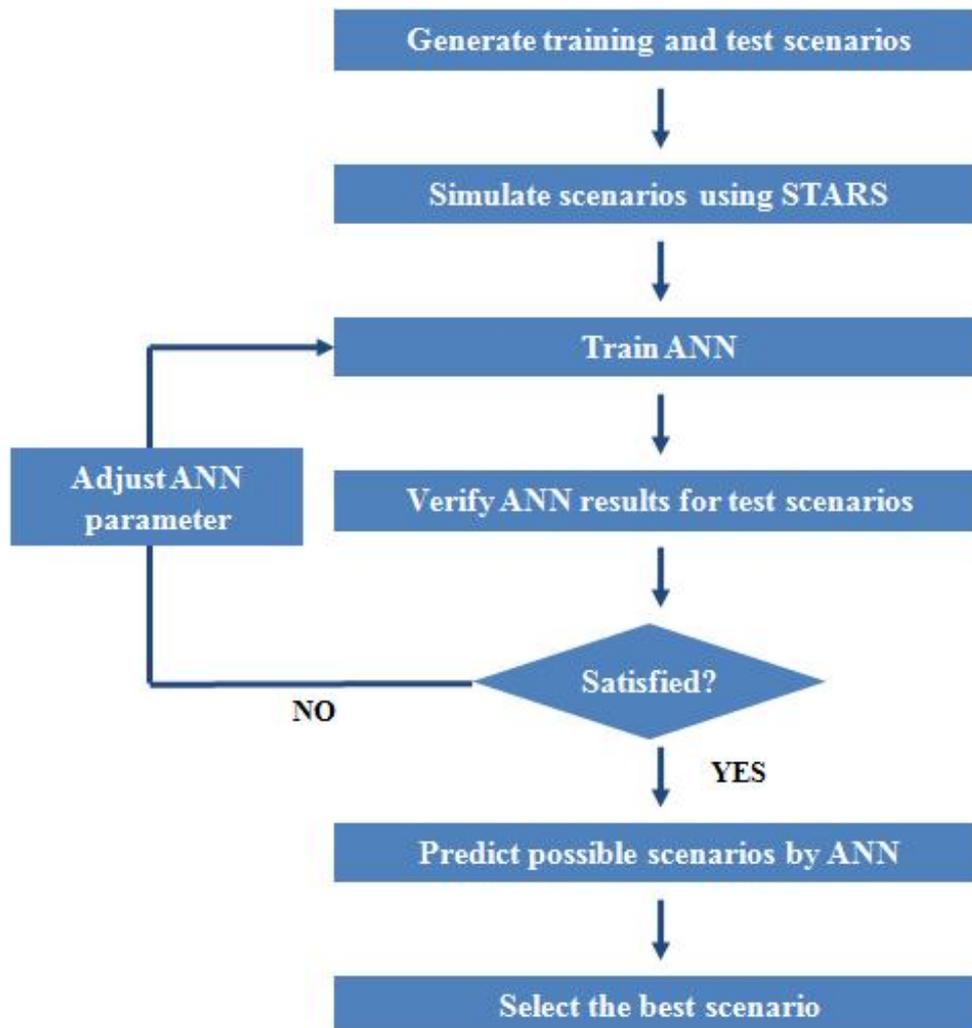


Figure 5.1 Flow diagram for optimizing wedge well technology using ANN.

5.2 인공신경망 입출력 자료

본 연구에서 웨지정의 증기주입압력을 최적화하기 위해 인공신경망 모델을 이용하였으며 인공신경망 모델의 입력 자료로는 생산구간별 증기 주입압력이다. 4장의 연구에서 웨지정은 SAGD 챔버가 만난 후에 시추하는 것이 효과적이라는 결과를 반영하여 생산 구간은 시물레이션 전체 기간 중 후반 6년으로 1년씩 총 6개의 구간으로 나누어 증기 주입압력을 변동시켰다. 인공 신경망의 입력 자료인 증기 주입압력은 SAGD 증기 주입압력인 2,900 kPa부터 4,000 kPa 범위 내에서 변동시켰으며 출력 자료는 누적 오일 생산량과 누적 증기-오일비이다.

인공신경망의 모든 입출력 자료는 식 (5.1)과 같이 학습과정의 수치적 안정성을 위하여 0과 1사이로 정규화하여 사용하였다.

$$X_{new} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5.1)$$

X_{\max} 는 학습에서 사용된 입출력 자료 X 의 최대값, X_{\min} 는 학습에서 사용된 입출력 자료 X 의 최소값, X_i 는 i 번째 예측 시나리오의 입출력 자료 X 값, X_{new} 는 0과 1사이로 정규화된 값이다.

5.3 연구 결과

캐나다 Athabasca 지역 B 광구의 유정 배치도는 Figure 5.2과 같다. 시뮬레이션 모델로는 상대적으로 NTG가 좋은 지역인 Pad 101-1과 101-2를 선정하였다. 시뮬레이션 모델은 두 쌍의 SAGD 유정을 포함한다. Figure 5.3은 3차원 형식의 시뮬레이션 모델을 나타내며 SAGD 유정은 I 방향의 수평정이다. Figure 5.4는 시뮬레이션 모델의 J-K 단면을 나타낸다. 왼쪽에 위치한 유정이 Pad 101-2, 오른쪽에 위치한 유정이 Pad 101-1이다. 저류층 시뮬레이션에는 CMG 사의 STARS™를 이용하였다. Pad 101-1과 Pad 101-2는 100 m 간격으로 떨어져 있다. 증기챔버가 대칭적으로 발달한다는 가정 하에 유정간의 간격 100 m의 절반에 해당하는 50 m의 간격을 두고 경계를 설정하였다. Figure 5.5는 시뮬레이션 모델의 I-J 단면으로 위쪽에 위치한 유정이 PAD 101-1, 아래쪽에 위치한 유정이 PAD 101-2이다. 경계면에서의 증기챔버 모양의 변형을 방지하기 위해 유정의 heel과 toe 부분에서 시뮬레이션 모델의 경계면까지 일정한 간격을 두었다. Figure 4.5는 Pad 101-1의 I-K 단면을 나타내며, 주입정과 생산정의 간격은 5 m이다.

Table 5.1은 시뮬레이션 모델의 대표적인 저류층 및 유체 물성을 나타낸다. 비튜멘의 점성도는 상온에서 약 50만 cp를 나타낸다. 시뮬레이션 모델 격자의 해상도는 I 방향은 50 m, J 방향은 2 m, K 방향은 2 m인 14×101×34의 격자 시스템으로 총 격자의 수는 48,076개로 구성되어 있다. 평균 수평 유체투과율은 약 2,500 mD이고 수직/수평 유체투과율비는 0.5이다.

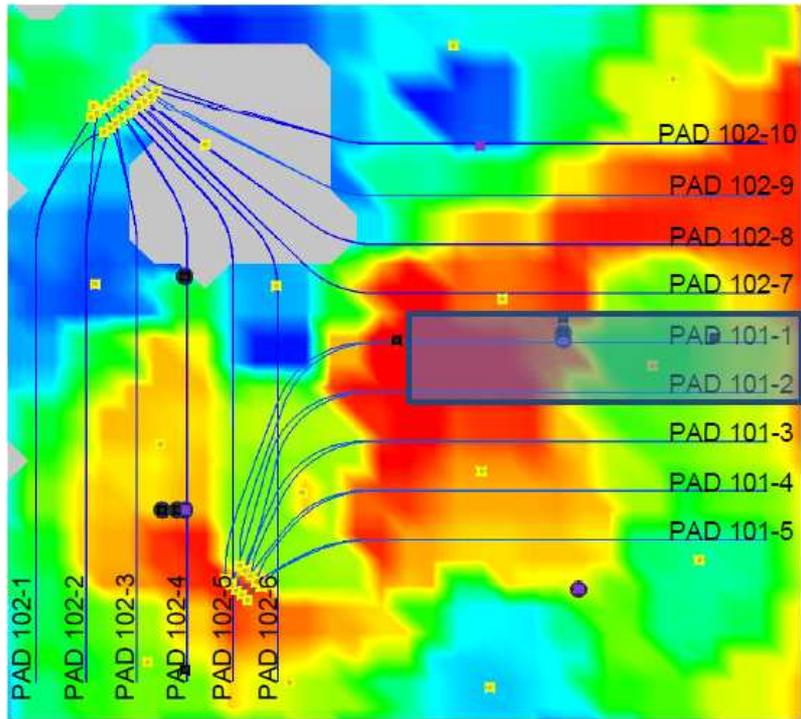


Figure 5.2 Planned SAGD wells.

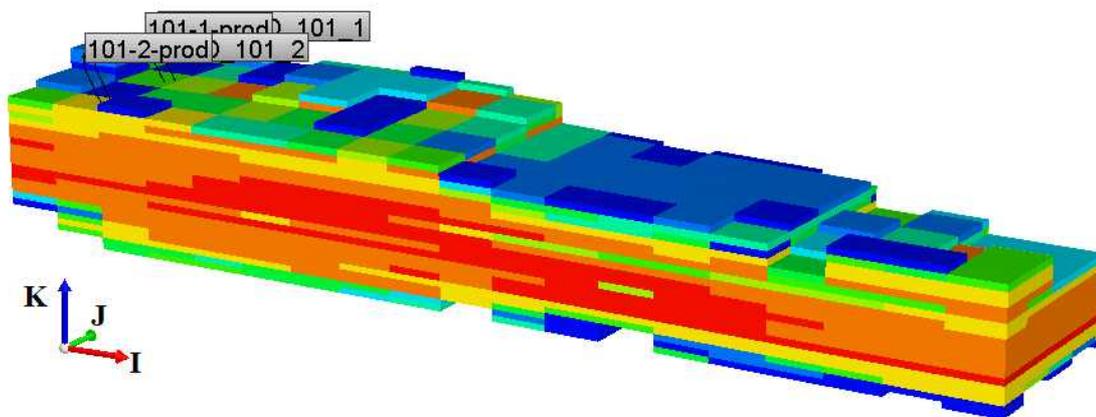


Figure 5.3 3D view of the simulation model.

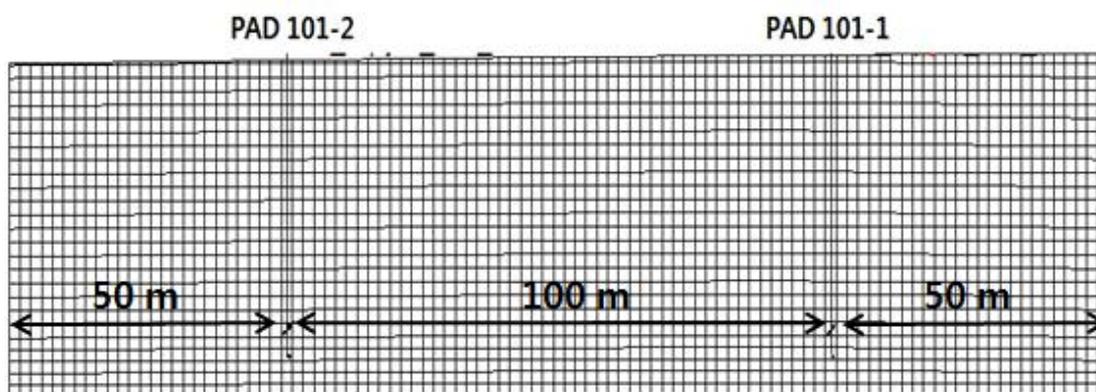


Figure 5.4 J-K cross section of simulation model.

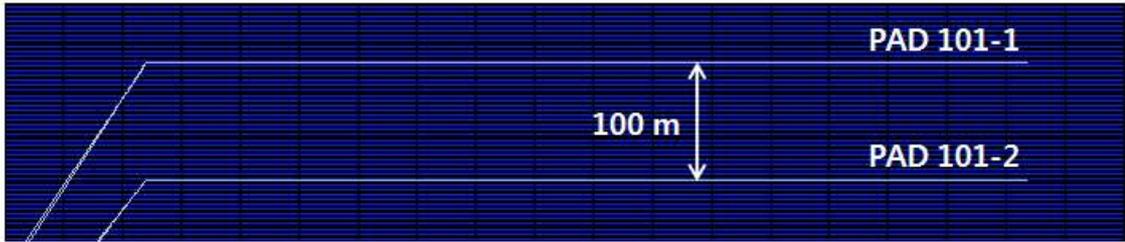


Figure 5.5 I-J cross section of simulation model.

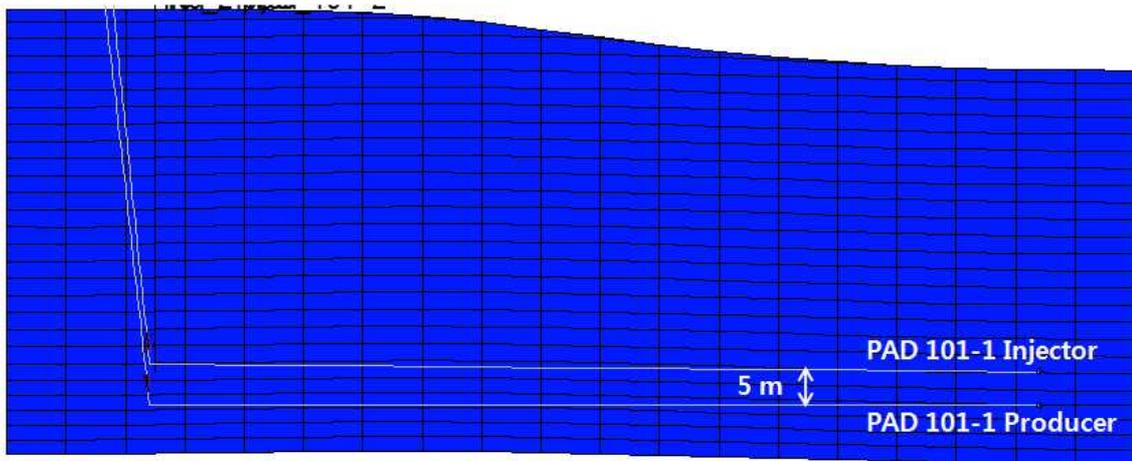


Figure 5.6 I-K cross section of simulation model.

Table 5.1 Reservoir factor and value

Parameter	Unit	Value
Initial reservoir temperature	°C	11
Initial reservoir pressure at 200m depth	kPa	2700
Average horizontal permeability	mD	2,504
Average vertical permeability	mD	1,252
Average porosity	-	0.3
Bitumen viscosity at 10°C	cp	2,864,376
Methane gas mole fraction	-	0.12
Effective formation compressibility	1/kPa	14E-6
Rock heat capacity	J/m ³ °C	2.60E+6
Water thermal conductivity	J/m·day°C	5.35E+4
Oil thermal conductivity	J/m·day°C	1.15E+4
Gas thermal conductivity	J/m·day°C	5.0E+3
Rock thermal conductivity	J/m·day°C	6.60E+5
Overburden heat capacity	J/m ³ °C	2.350E+6
Overburden thermal conductivity	J/m·day°C	1.496E+5
Underburden thermal capacity	J/m ³ °C	2.350E+6
Underburden thermal conductivity	J/m·day°C	1.496E+5

5.4 인공신경망의 예측성능 평가

Table 5.2는 전체 시뮬레이션 기간을 나타내며 그 중 전반 7년(2012년 - 2019년)은 SAGD로만 생산하는 구간이다. 2019년부터 2025년까지는 SAGD와 웨지정을 모두 운영하는 구간이며 웨지정의 증기 주입압력을 각 1년씩 6개의 구간으로 나누어 변동시켰다. 웨지정의 증기 주입압력을 생산구간별로 2,600 kPa부터 4,000 kPa 범위 내에서 100 kPa 간격으로 변동시킬 경우 약 1천만 개의 생산 시나리오의 경우의 수가 발생한다. 이러한 다수의 생산 시나리오를 신속하고 정확하게 평가하기 위해 연산속도가 빠른 인공신경망 모델을 이용하여 최적의 증기 주입압력을 선정하였다. 인공신경망 학습을 위해 100개의 학습 시나리오가 이용되었다. 학습시킨 인공신경망 모델의 개발한 인공신경망 모델은 효용성을 검증하기 위하여 20개의 시나리오로 검증 과정을 거쳤다. 검증에 사용된 통계인자는 상관계수와 AAPE(Average Absolute Percent Error)이다.

$$Error_i = Measured_i - Estimated_i \quad (5.2)$$

$$AAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Error_i}{Measured_i} \right| \quad (5.3)$$

Table 5.3는 20개의 검증 시나리오에 의해 검증된 인공신경망 모델의 상관계수와 예측오차를 나타낸다. 그 결과, 누적 증기-오일비의 상관계수는 0.93, 예측오차는 0.99%이며 회수율의 상관계수는 0.96이고 예측오차는 0.58%로 인공신경망 모델은 신뢰할 수 있는 예측성능을 나타내었다.

Table 5.2 Wedge well production time period for optimization

Period	Time	Date
Preheating	3 months	2012.01.01 ~ 2012.04.01
SAGD	7 years	2012.04.01 ~ 2019.01.01
Period 1	1 years	2019.01.01 ~ 2020.01.01
Period 2	1 years	2020.01.01 ~ 2021.01.01
Period 3	1 years	2021.01.01 ~ 2022.01.01
Period 4	1 years	2022.01.01 ~ 2023.01.01
Period 5	1 years	2023.01.01 ~ 2024.01.01
Period 6	1 years	2024.01.01 ~ 2025.01.01

Table 5.3 Prediction performance of the ANN model

Statistical Parameter	CSOR	Recovery Factor
Correlation coefficient	0.93	0.96
AAPE (%)	0.99	0.58

5.5 인공신경망을 이용한 최적 생산 시나리오 선정

검증한 인공신경망 모델을 이용하여 신속하게 20만 개의 생산 시나리오를 시뮬레이션 하였고 그 중 최적 생산 시나리오를 선정하였다. Table 5.4와 Figure 5.7은 선정된 상위 5개의 최적 운영 계획을 나타낸다. 선정된 최적 운영방안은 웨지정을 두 SAGD 유정 시스템의 증기챔버가 합쳐진 후에 개시할 경우 웨지정의 증기 주입압력을 높게 유지하다가 생산 후반에 낮추는 것이 효율적이다.

두 SAGD 유정 시스템의 증기챔버가 합쳐진 후에는 이미 SAGD의 증기 챔버가 성숙기에 접어들어 효율이 감소하기 시작한다. 이 때 웨지정의 증기 주입압력을 높게 유지하여 SAGD 주입정 운영을 최소화하고 불필요한 증기 주입을 막아 효율을 다시 증진시킬 수 있다. 또한 웨지정은 두 SAGD 증기 챔버의 사이에 잔류하는 비튜멘을 회수함으로써 회수 효율을 증진할 수 있다. 앞에서 언급했던 증기채널링으로 인한 문제는 증기챔버(1개의 웨지정, 2개의 SAGD 챔버)가 저류층 전반에 걸쳐 균형적으로 합쳐졌기 때문에 웨지정의 증기 주입압력이 높아 SAGD의 운영이 중지되더라도 효율을 잃지 않는다. 증기챔버의 확장이 상당부분 진행된 뒤에는 주입 압력을 낮추어 증기를 거의 주입을 하지 않고 저류층 내부에 이미 주입된 에너지를 이용해 비튜멘을 생산하여 누적 증기-오일비를 낮출 수 있다.

Table 5.5는 선정된 최적 생산 시나리오와 웨지정의 증기 주입 압력을 2,900 kPa, 3,500 kPa, 4,000 kPa로 일정하게 유지한 경우의 총 오일 생산량과 누적 증기-오일비를 비교한 것이다. 최적 시나리오를 증기 주입압력을 3,500 kPa로 고정한 경우와 비교했을 때 비슷한 누적 증기-오일비를 보이면서 총 오일 생산량이 약 6% 증진됨을 알 수 있다.

Table 5.4 Top 5 optimal production scenarios for steam injection pressure

Rank	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5	Period 6
1	4000	3900	4000	4000	4000	2900
2	4000	3900	3800	4000	3900	2900
3	3900	3700	4000	4000	4000	2800
4	4000	3800	4000	4000	3900	2600
5	3900	3800	4000	4000	3800	2800

Table 5.5 Comparison of cumulative oil production and cSOR for the oilsand field

Case	Cum. Oil Production (Mm³)	cSOR
Optimum Scenario	711.97	2.77
Wedge Well at 2,900 kPa	602.27	2.53
Wedge Well at 3,500 kPa	674.38	2.74
Wedge Well at 4,000 kPa	708.24	2.91

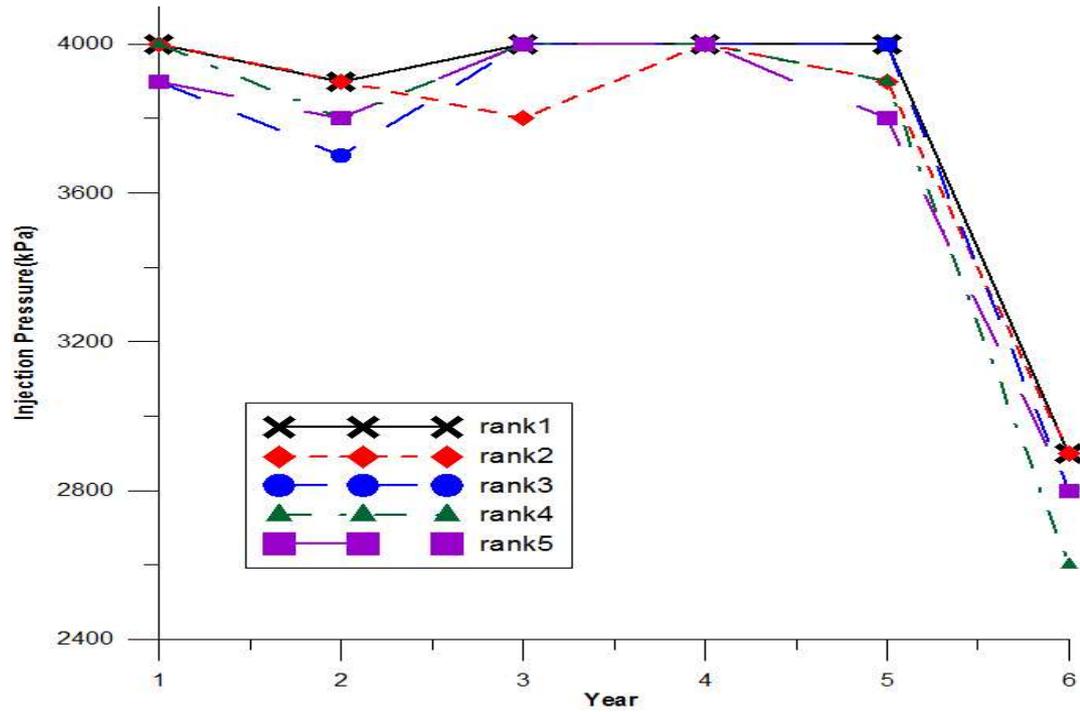


Figure 5.7 Top 5 optimal production scenarios for steam injection pressure.

6. 결 론

이 연구에서는 SAGD 생산 필드에서 웨지정 공법을 적용시 발생하는 증기채널링 현상을 밝히고 현장 적용이 용이한 증기채널링 감지 인자를 개발하였다. 개발한 감지 인자를 통해 인지된 증기채널링 발생 구역은 SAGD와 웨지정의 병합 운영방식으로 채널링 현상을 극복할 수 있었다. 웨지정의 최적 운영 시나리오는 인공지능망 기법에 의해 개발했고, 이를 Athabasca 지역 B 광구에 적용하여 웨지정 공법의 효율적인 생산 계획을 수립하였다. 연구 결과를 토대로 아래의 결론을 도출하였다.

(1) 기존 웨지정 공법 시뮬레이션은 대부분 2차원 균질 저류층에서 수행되어왔다. 실제 현장 광구에 웨지정 공법 시뮬레이션을 수행한 결과 저류층 불균질성으로 인해 증기채널링 현상이 발생하여 SAGD 주입정의 증기 주입이 중단되는 것을 확인하였다.

(2) 각 유정 시스템의 누적 증기-오일비를 통해 두 증기챔버의 불균형 발달을 감지할 수 있다. 누적 증기-오일비가 큰 유정은 다른 유정으로 증기를 주입하는 유정이며, 누적 증기-오일비가 작은 유정은 다른 유정으로부터 증기가 유입되는 유정이다. 이를 통해 발달이 빠른 증기챔버가 발달이 느린 증기챔버를 지배하는 현상을 감지할 수 있다. 또한 각 유정 시스템의 증기 주입량을 통해 증기채널링 현상을 감지할 수 있으며 SAGD 주입정의 증기 주입이 중단될 때 증기채널링이 발생한다.

(3) 개발한 인공지능망은 저류층 시뮬레이터 CMG STARS에 비해 연산

속도가 빨라 다양한 변동압력법 생산 시나리오 평가에 소요되는 시간을 크게 단축하였다. 캐나다 Athabasca 지역 B 광구 저류층에 인공신경망을 적용한 결과 누적 증기-오일비의 상관계수는 0.93, 예측오차는 0.99%이며 회수율의 상관계수는 0.96이고 예측오차는 0.58%로 인공신경망 모델은 신뢰할 수 있는 예측성능을 나타내었다.

(4) 가상 저류층과 캐나다 Athabasca 지역 B 광구 저류층에 적용한 결과, 최적 생산 시나리오는 웨지정을 두 SAGD 유정 시스템의 증기챔버가 합쳐진 후에 개시하는 것이 효과적이었다. 증기채널링이 발생한 경우 SAGD 유정 시스템이 중단되면서 웨지정 공법이 전체 운영시스템을 지배하게 된다. 그러나 일반적으로 웨지정 공법의 에너지 효율이 SAGD보다 낮기 때문에 생산 초반에 웨지정을 시추하는 경우 전체적인 생산 효율을 저해할 수 있다.

(5) 웨지정을 두 SAGD 유정 시스템의 증기챔버가 합쳐진 후에 개시할 경우 웨지정의 증기 주입압력을 높게 유지하다가 생산 후반에 낮추는 것이 효율적이다. 두 SAGD 유정 시스템의 증기챔버가 합쳐진 후에는 이미 SAGD의 증기챔버가 수평적으로 성장하여 비효율적인 SAGD 작업이 이루어졌다. 이 경우 웨지정의 공법이 전체 운영시스템을 지배하게 하는 것이 가장 에너지효율이 높았다. 기존 SAGD 유정 시스템 사이의 증기이동을 최소화하기 위해 웨지정의 증기 주입압력을 증가시켜 운영하고, 충분히 웨지정의 증기챔버가 성장한 이후에는 증기 주입압력을 감소시켜 잠열을 이용한 에너지효율성 확보와 증기챔버 사이의 간섭 최소화가 필수적이었다.

참고 문헌

한학용: 패턴인식 개론(MATLAB 실습을 통한 입체적 학습), 한빛미디어, 서울, 2005.

서울대학교 산학협력단, *Wedge wells* 공법을 활용한 SAGD 사후 증산 기법 연구, 최종보고서, 서울대학교, 서울, 2012.

Albahlani, A. M.: "A Critical Review of the Status of SAGD: Where Are We and What is Next?", paper SPE 113283 presented at the SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting, Bakersfield, California, USA, 29 March-2 April 2008.

Arthur, J. E.: "Recovery Process", United States Patent, US 7,556,099 B2, Canada, 7 July 2009.

Coskuner, G.: "In Situ Thermal Process for Recovering Oil form Oil Sands", United States Patent, US 2009/0288827 A1, Canada, 26 November 2009.

Coskuner, G.: "A New Process Combing Cyclic Steam Stimulation and Steam-Assisted Gravity Drainage : Hybrid SAGD", *Journal of Canadian Petroleum Technology* (January 2009) **48**(1), 8-13.

Cyr, T.: "Steam-assisted Gravity Drainage Heavy Oil Recovery Process", United States Patent, US 6,257,334 B1, Canada, 10 July 2001.

Elliott, K. T. and Kovscek, A. R.: "Computer Simulation of Single-well Steam Assisted Gravity Drainage", U.S. Department of Energy, July 1999.

Gates, I. D. and Wang, J.: "Evolution of In Situ Oil Sands Recovery Technology : What Happened and What's New?", paper SPE 150686 presented at the SPE Heavy Oil Conference and Exhibition, Kuwait City, Kuwait, 12-14 December 2011.

Gates, I. D.: "Optimization of Steam Assisted Gravity Drainage in McMurray Reservoir", *Journal of Canadian Petroleum Technology* (September 2006) **45(9)**, 54-62.

Li, W. and Mamora, D. D.: "Numerical Investigation of Potential Injection Strategies to Reduce Shale Barrier Impacts on SAGD Process", *Journal of Canadian Petroleum Technology* (March 2011) **50(3)**, 57-64.

McLennan, J. A. and Deutsch, C. V.: "Best Practice Reservoir Characterization for the Alberta Oilsands.", paper 2006-096-EA presented at the Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 13 – 15 June 2006.

Polikar, M. and Cyr, T.: "Fast-SAGD : Half the Wells and 30% Less Steam", paper SPE/PS-CIM 65509 presented at the SPE/CIM International Conference on Horizontal Well Technology, Calgary, Alberta, Canada, 6-8 November 2000.

Shin, H. and Polikar, M.: "Fast-SAGD Application in the Alberta Oil Sands Areas", *Journal of Canadian Petroleum Technology* (September 2006) **45(9)**, 46-53.

Shin, H. and Polikar, M.: “Review of Reservoir Parameters to Optimize SAGD and Fast-SAGD Operating Conditions”, *Journal of Canadian Petroleum Technology* (January 2007) **46**(1), 35-41.

Shin, H. and Choe, J.: “Shale Barrier Effects on the SAGD Performance”, paper SPE 125211 presented at the SPE/EAGE Reservoir Characterization and Simulation Conference, Abu Dhabi, UAE, 19-21 October 2009.

Tamer, M. and Gates, I. D.: “Impact of Different SAGD Well Configurations(Dover SAGD Phase B Case Study)”, *Journal of Canadian Petroleum Technology* (January 2012) **51**(1), 32-45.

Zhao, L., Law, S. and Coates, R.: “Numerical Study and Economic Evaluation of SAGD Wind-Down Methods”, *Journal of Canadian Petroleum Technology* (January 2003) **42**(1), 54-57.

Abstract

Optimized operation of wedge-well technology considering steam channelling among vapor chambers

Soonhyeong Jeong
Department of Energy Systems Engineering
The Graduate School
Seoul National University

A wedge-well has been employed to enhance bitumen recovery for the field operated by SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage). Previous works related to the enhanced recovery by wedge well have focused on the growth of the steam chambers in homogeneous reservoirs, thereby overlooking the effect of steam channeling in heterogenous reservoirs.

This study proposes the optimized operating conditions of wedge-well to investigate the interference effect among steam chambers. The start-up period and the steam injection pressure are taken as operating variables for enhancing the recovery by wedge-well. The steam injection pressure is optimized using artificial neural network after determining the start-up period by scenario analysis.

The reliability of this method is validated for the oil sands reservoir in Athabasca, Canada. It shows that the highest efficiency is obtained when wedge-well is drilled after SAGD steam chambers are merged. This is due to the fact that the early start-up of wedge-well causes severe steam channeling. The performance of the wedge-well is maximized by keeping its injection pressure higher than that of SAGD at the earlier stage of production, whilst the efficiency of wedge-well is improved by lowering the injection pressure to use the latent heat in the mature steam chambers at the later stage of production. The proposed

approach can be applied to the oil sands when the growth of the steam chambers is critical to enhance bitumen recovery.

Keywords: wedge-well, SAGD, artificial neural network, oil sands

Student number: 2011-21108