

## 탄산염 균열저류층에서 균열시스템 특성변수를 적용한 SAGD 시뮬레이션 연구

나주환<sup>1)</sup> · 장일식<sup>1)\*</sup>

### Analysis on the SAGD Simulation Using Characteristic Variable of Fracture System in Fractured Carbonate Reservoirs

Ju-Hwan Na and Il-Sik Jang\*

(Received 10 August 2017; Final version Received 24 October 2017; Accepted 26 October 2017)

**Abstract :** The OOIP (original oil in-place) of bitumen in fractured carbonate reservoir of Grosmont, Canada is estimated at about 406.5 billion barrels. The Grosmont reservoir is characterized as various matrix sizes due to heterogeneity in fracture density. SAGD simulations for the Grosmont Formation have been based on the dual porosity and dual permeability model. In this study, characteristic variables for fracture system are considered to reflect the mechanism in fracture due to steam injection. The result shows that the characteristic variables play important role in dual porosity model, while trivial in dual permeability model. The effect of the characteristic variables for fracture system has been investigated in terms of the optimal preheating period, recovery factor, and cSOR.

**Key words :** Fractured carbonate reservoir, SAGD, Dual porosity model, Dual permeability model, Characteristic variable of fracture system

**요약 :** 탄산염 균열 저류층인 캐나다 Grosmont 층은 약 4,065억 배럴의 비튜멘이 부존되어 있다. Grosmont 저류층은 불균질한 균열 발달로 다양한 크기의 매질이 혼재되어 있는 특성을 가진다. Grosmont 층에 대한 기존 SAGD 시뮬레이션은 이원공극 모델과 이원투과도 모델이 적용되고 있다. 이 연구에서는 스팀주입에 따른 균열 내 현상을 반영한 균열시스템 특성변수를 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 이원투과도 모델에서는 영향이 미미하였으나 이원공극 모델에서는 균열시스템 특성변수에 따라 큰 차이를 보였다. 이원공극 모델에서 균열시스템 특성변수에 따른 최적 예비가열 기간을 도출하고 SAGD 생산 시뮬레이션에 미치는 영향을 분석하였다.

**주요어 :** 탄산염 균열 저류층, SAGD, 이원공극모델, 이원투과도모델, 균열시스템 특성변수

## 서 론

캐나다 북부 앨버타 주에 부존되어 있는 비튜멘의 원시 부존량은 약 1조 8,440억 배럴로 추정되며, 이 중 Grosmont 층에 약 4,065억 배럴이 부존되어 있다(Ezeuko *et al.*, 2013). Grosmont 층은 복잡한 퇴적환경과 속성작용에 의해 매우 균질한 특성을 가지는 탄산염 균열저류층으로, 500 km×150 km에 이르는 광범위한 규모로 분포되어 있다(Fig. 1). 저류층 심도는 200~1,000 m에 이르며, 저류층 유체로는 초기상

태조건일 때 점성도가 1,000,000 cp를 넘어 유동성이 거의 없는 비전통 탄화수소에 속한다.

SAGD(steam assisted gravity drainage) 기법은 오일샌드 개발에 효과적으로 이용되는 상압적 열주입 기법 중 하나이다. 두 개의 수평정으로 구성되며, 상부에 스팀 주입정과 하부에 생산정이 위치한다(Fig. 2). 일반적으로 주입정은 생산정 상부에서 5~10 m 위에 설치하며, 생산정은 저류층 기저로부터 약 2 m 위에 위치한다. 두 수평정의 길이는 500~1,000 m이며, 보통 800 m 내외인 경우가 많다. SAGD 기법을 운영하기에 앞서 약 3개월 정도 주입정과 생산정을 예열(preheating)시켜, 주변 저류층의 온도를 높이는 과정을 거친다. 이후 주입정을 통해 스팀이 지속적으로 주입되면 주입정 위쪽으로 스팀챔버가 형성된다. 형성된 스팀챔버에 의해 비튜멘의 점성도가 감소하고, 유동 가능해진 비

1) 조선대학교 에너지자원공학과

\*Corresponding Author(장일식)

E-mail; isjang77@chosun.ac.kr

Address; Dept. of Energy & Resources Engineering, Chosun University, Gwangju, Korea

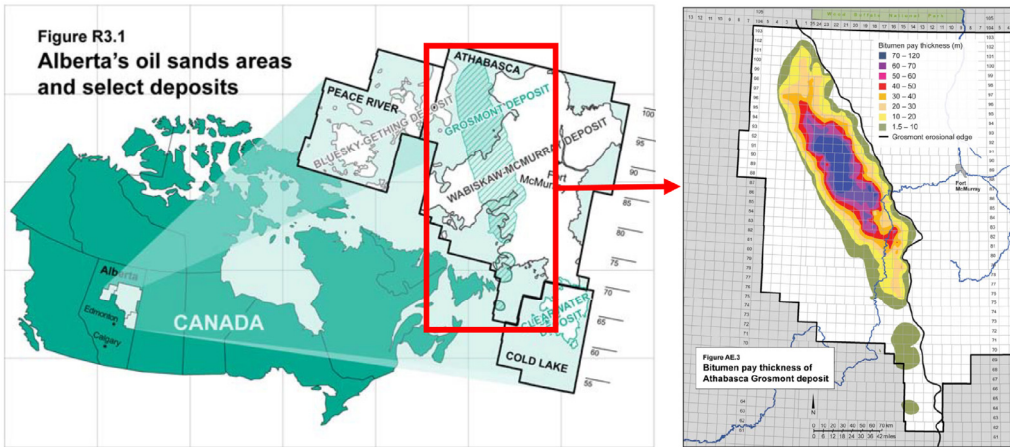


Fig. 1. Location of grosmont formation (AERCB, 2012).

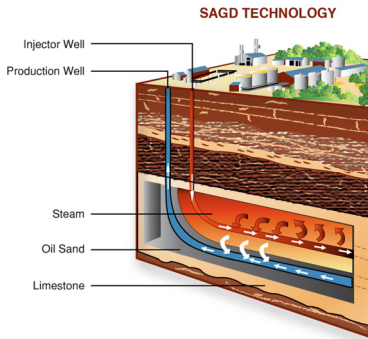


Fig. 2. Schematic of SAGD process (Surmont Energy Ltd., 2017).

튜멘은 응축된 증기와 함께 중력에 의해 스팀챔버의 벽면을 따라 아래쪽으로 유동하여 생산정을 통해 생산된다. 탄산염 균열저류층의 비튜멘에 대한 SAGD 기법은 시뮬레이션 연구와 파일럿 테스트를 통해 매우 제한적으로 수행되어 왔다. Sola and Rashidi(2006)은 이란에 위치한 탄산염 저류층의 증질유에 대해 시뮬레이션을 수행하여 SAGD 기법이 적용 가능함을 제시하였다. Das(2007)는 CSS(cyclic steam stimulation)과 SAGD 기법의 적용성 연구를 수행한 결과, SAGD 기법의 경우 8년 동안 약 34%의 회수율을 보여 적용가능성이 높은 방법임을 확인하였다. Lee et al.(2009)은 탄산염암 증질유전의 열주입 생산거동을 예측하기 위해 변수민감도 분석을 수행하였으며, 저류층 조건에 따라 SAGD 기법이 적용 가능한 것을 확인하였다.

Qi and Yuan(2013)는 Grosmont 층 시뮬레이션 통해 히스토리 매칭 작업을 수행한 결과, 균열의 분포가 스팀의 온도전파에 영향을 미치는 것으로 나타났다. Ezeuko et

al.(2013)은 다중개체(multiple object) 모델링을 사용해 Grosmont 층을 matrix, fracture, vug, breccia, 그리고 cavern의 5가지 유형으로 분류하여 저류층 모델을 구축하였으며, SAGD 기법 적용 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 다양한 유형의 개체가 혼재되어 불균질성이 큰 경우 SAGD와 같이 연속적으로 주입하는 스팀주입 공법은 적용이 어려운 것으로 예측하였다. Choi et al.(2014)은 균열특성을 반영한 Grosmont 탄산염 저류층 모델에 대한 SAGD 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 그 결과, 균열이 많이 발달하여 암체에서 균열로의 비튜멘 생산이 용이한 지역을 개발한다면 상업성이 충분히 확보될 것으로 평가하였다.

이 연구에서는 시뮬레이션 분석을 통해 이원공극(DP: dual porosity) 모델과 이원투과도(DK: dual permeability) 모델에서 SAGD 기법 적용 시 나타나는 차이점을 분석하였다. 또한 캐나다 Grosmont 층의 균열 분포 특성을 파악하였으며, 균열 저류층에 스팀 주입 시 나타나는 특성에 대해 균열시스템 특성변수를 도입하여 SAGD 시뮬레이션에 미치는 영향을 분석하였다.

### 균열 모델링 기법 분석

탄산염 균열저류층의 균열특성을 모사하기 위한 개념적 모델링 방법으로는 DP 모델과 DK 모델이 있다. 이 모델들은 저류층을 매질시스템(matrix system)과 균열시스템(fracture system)으로 나누고, 두 시스템이 상호작용하는 중첩계산격자(superimposed computational grid)로 구성된다(Fig. 3). 두 모델은 모두 균열시스템과 매질시스템을 각각 등가 연속체로 가정한다. 균열 및 매질의 특성에 따라 DP 및 DK 모델 중 하나가 선택되어 사용된다.

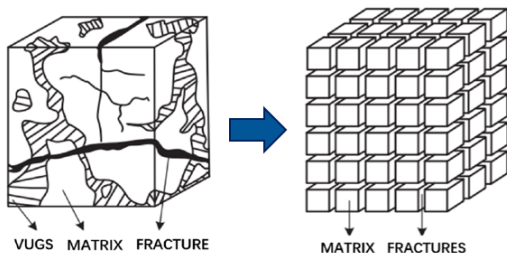


Fig. 3. Conceptual modeling of fractured reservoirs.

### 이원공극모델

DP 모델은 균열저류층의 거동을 가장 단순하게 묘사한 모델이다. 높은 공극률과 낮은 유효투과도의 특성을 가지는 매질시스템은 유체를 균열에 공급하는 역할을 하고, 유효투과도가 높은 균열시스템은 암체에서 빠져나온 유체가 이동하는 통로 역할을 한다(Fig. 4(a)). 따라서 균열이 잘 발달하여 암체의 연속성이 좋지 않은 특성을 가지는 저류층에 DP 모델을 사용하는 것이 적절한 것으로 알려져 있다.

DP 모델을 사용하여 열주입 기법 시뮬레이션을 수행하면 다음과 같은 현상을 예측할 수 있다. 주입정에 의해 스팀이 주입되면, 스팀은 균열시스템에만 흘러 들어간다. 이후 균열 내 고온의 열은 인접한 암체로의 유체유동에 의한 대류(convection) 및 온도 차이에 의한 열전도(heat conduction)를 통해 매질로 이동하여 매질의 온도를 높여준다. 그러나 일반적으로 균열의 부피가 전체 부피의 10%에도 미치지 않기 때문에 균열을 통해 주입되는 총 열량으로는 주변 매질의 온도를 효과적으로 높이기 어렵다. 따라서 주변으로의 열전달을 통해 매질의 온도를 높이기 위해 오랜 시간이 소요되며 효과적인 열유동이 일어나지 않게 된다. 초기 생산이 이루어지는 시기도 열 주입 이후 상당히 오랜시간이 지난 뒤에 나타난다. 이와 같은 현상으로 인해 기존의 DP 모델 연구에서는 SAGD기법이 비투멘 생산에 효율적이지 않은 것으로 분석되었다.

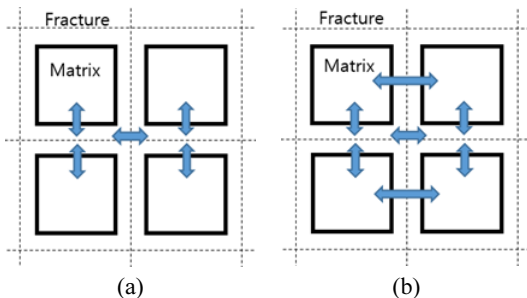


Fig. 4. Comparison of interaction between matrix and fracture system in (a) dual porosity model (b) dual permeability model.

또한 생산정 부근에서는 다음과 같은 현상을 예상할 수 있다. 실제 주입정을 통해 스팀을 주입하는 경우 균열로의 스팀주입 뿐만 아니라 주입정과 연결된 매질에도 직접 스팀이 주입될 것이다. 이 경우 주입정 부근의 균열과 매질 내에 직접 주입된 총열량은 DP 모델에서의 균열만으로 주입된 열량보다 훨씬 많아지게 되며, 주변으로의 열대류 및 열전달을 통해 보다 많은 열이 이동하여 DP 모델보다 온도를 쉽게 높이는 현상을 보일 것이다.

### 이원투과도모델

DK 모델은 DP 모델과 달리 매질 및 균열시스템 모두 유체와 열의 유동이 가능한 모델이다(Fig. 4(b)). 즉, 인접한 매질과 균열의 상호 유동이 가능할 뿐만 아니라, 매질 간의 유동도 가능한 모델이다. 비교적 균열이 적게 발달해 있으며 매질의 유동 능력이 우수한 특성을 가지는 저류층에 DK 모델을 사용하는 것이 적합하다.

DK 모델을 사용해 열주입 기법 시뮬레이션을 수행하면 다음과 같은 현상을 예상할 수 있다. 스팀이 주입되기 시작하면 주입정에서 스팀이 매질 및 균열시스템으로 직접 유동하여 주입정과 연결된 매질과 균열 격자 모두 고온으로 가열된다. 가열된 매질에 유입된 총열량은 균열로 유입된 열량에 비해 매우 크기 때문에 매질에서 매질로 또는 매질에서 균열로의 열전달에 있어서 상당한 열이 이동하여 주변 온도를 쉽게 상승시킬 수 있다. 즉, 동일한 최대 주입량 및 주입압력 조건을 적용할 때 DP 모델에 비해 DK 모델은 주입정에서 주입되는 총열량이 많고 매질 간 직접적 열전달이 가능하기 때문에 스팀챔버 형성이 용이할 뿐만 아니라 챔버의 확장도 쉽게 발달하게 된다.

### Grosmont 층 시추공 코어자료 분석

캐나다 앨버타주에 위치한 Grosmont 층에 대한 시추공 코어자료가 Fig. 5에 나타나 있다. Grosmont 층은 복잡한 퇴적환경 및 속성작용으로 인해 균열이 잘 발달해 있으며 다양한 크기의 매질로 이루어진 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)는 균열 발생빈도가 높아 매질의 크기가 매우 작은 경우이며, Fig. 6(b)는 매질이 일정 크기 이상의 규모를 가지는 경우를 나타낸 것이다. 균열빈도가 매우 큰 경우 균열간격은 최소 0.2 cm, 평균 7 cm, 그리고 표준편차 6 cm 인 감마 분포를 따르는 것으로 분석되었다(MKE, 2011). 이때 코어링 과정 중에 인위적인 균열도 발생할 것으로 예상되나 기존 분석에서는 모두 자연균열로 간주하였다. Fig. 6(a)와 같은 특성을 보이는 매질에 스팀을 주입하면, 크기가 매우 작은 매질은 스팀 유입과 동시에 스팀의 온도에 가깝게 상승할 것이다. 반면 Fig. 6(b)와 같이 일정 크기 이상의 매질에서는 스팀 주입 시 균열의 열이 매질로 전달되면서 서서히



Fig. 5. Core sample of grosmont formation (MKE, 2011).



(a)



(b)

Fig. 6. Core samples with (a) very small matrix (b) moderate matrix (MKE, 2011).

온도가 상승한다. 이처럼 불균질한 균열 발달로 다양한 크기의 매질과 균열이 혼재되어 있는 저류층에서 스팀주입에 따른 온도변화를 모델링하기 위해서는 균열시스템의 특성변수를 고려해야 한다.

#### 균열시스템 특성변수

균열 내에 고온의 스팀이 유입되는 경우, 스팀 유입과 동시에 균열에 접해있는 매질 표면은 열전도에 의해 고온으로 상승한다(CMG, 2016). 이때 고온으로 즉시 상승하는 부분은 매질 표면의 얇은 층으로 국한된다. 또한, Fig. 6(a)와 같이 매우 작은 암체가 스팀과 접촉할 때 암체의 온도가 스팀 온도에 도달하는 시간도 매우 짧을 것으로 예상된다.

균열 저류층 모델링 시 위의 상황을 보다 효과적으로 고려하기 위해 이 연구에서는 균열시스템을 다음과 같이 재정의하였다. Fig. 7과 같이 개념적 모델에서 균열시스템을 균열 공간, Fig. 6(a)와 같은 작은 암체, 그리고 매질 표면일부로 구성한다. Fig. 7에서 내부의 흰색 사각형들은 매질시스템을 형상화한 것이며, 흰색 사각형 사이의 영역은 균열시스템을 나타낸 것이다. 즉, 균열시스템은 순수 균열뿐만 아니라 회색원으로 나타낸 작은 암체, 빗금 친 사각 프레임으로 나타낸 매질의 표면을 포함한다.

균열시스템의 구성요소를 기술하기 위해 다음과 같은 균열시스템 특성변수를 도입하였다. 즉, 전체 부피에 대한 균열시스템의 비율  $F_f$  과 균열시스템 내의 매질 비율  $F_{mf}$  이라는 2가지 변수를 식 (1), (2)와 같이 정의하였다.

$$F_f = \frac{V_f}{V_b} \quad (1)$$

$$F_{mf} = \frac{V_{mf}}{V_f} \quad (2)$$

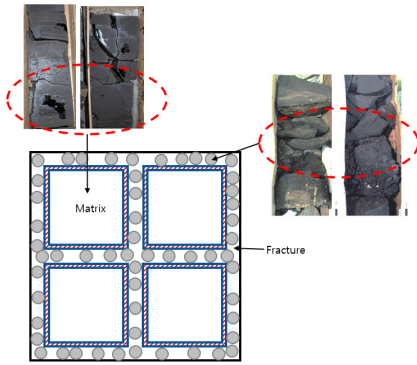


Fig. 7. Schematic of fractured carbonate reservoirs.

여기서,  $V_b$ 는 저류층 전체부피,  $V_f$ 는 균열시스템의 부피,  $V_{mf}$ 는 균열시스템 내에 존재하는 매질의 부피를 나타낸다. 균열의 유효공극률  $\phi_f$ 는 전체부피에 대한 균열만의 부피로 정의되며 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\phi_f = F_f(1 - F_{mf}) \quad (3)$$

만약, 균열시스템 내에 매질의 표면이나 작은 암체를 포함하지 않는 경우  $F_{mf} = 0$ 의 값을 갖게 되고  $F_f$ 는 균열의 유효공극률에 해당한다.

균열시스템으로 스팀이 유입되면 균열시스템 내의 구성요소들의 온도는 동시에 상승한다. 여기서, 균열시스템 내의 유체유동 및 열전달의 특성 즉, 절대 및 상대유체투과도, 열용량(heat capacity) 및 열전도도(heat conductivity)는 구성요소들의 부피가중평균 값을 사용한다. 암체의 열전도도는 유체의 열전도도보다 훨씬 크기 때문에 가중평균 값은 균열 내 유체만 고려할 때보다 더 큰 값을 가지게 되며, 시뮬레이션 과정에서 균열 및 매질시스템 간의 총 열전달 양이 많아져 매질시스템의 온도가 쉽게 상승하는 결과를 보일 것이다. 이렇게 균열 저류층 모델링에 있어서 위의 두 변수를 고려하면 균열 특성을 개념적으로 단순하게 모사한 DP 모델보다 스팀 주입의 현상을 보다 현실적으로 모사할 수 있다. 서론에 제시된 기존 연구들에서는 균열시스템 특성변수를 고려하지 않았으며, 그 결과 DP 모델에서 SAGD 적용시 생산성이 매우 낮게 나타났다. 반면, DK 모델에서는 매질로의 스팀 유입 및 매질 간 유동이 가능하기 때문의 위의 변수도입에 따른 영향은 미미할 것으로 판단된다.

### 탄산염 균열저류층 모델 구축

탄산염 균열저류층 모델에서 SAGD 기법을 모사하기 위

해 CMG사의 STARS를 사용하였다(CMG, 2016). 탄산염 저류층은 다양한 개체로 구성될 수 있지만 모델의 단순화를 위해 균열만 존재하는 것으로 가정하고, 저류층을 2차원 격자로 구성하였다. 시뮬레이션 수행시간을 감소시키기 위해 Fig. 8과 같이 두 개의 수평정을 중심으로 왼쪽 저류층만을 고려하였다. 대상 저류층은 I, J, 그리고 K 방향으로  $50 \times 800 \times 30 \text{ m}^3$ 의 크기이며,  $50 \times 1 \times 30$ 개의 격자로 나누어 총 1,500개의 격자를 갖도록 구성하였다. 모델의 외부경계

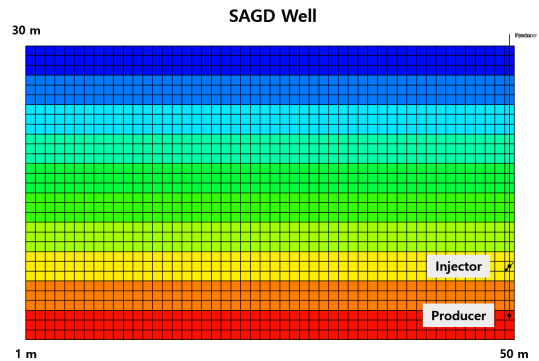


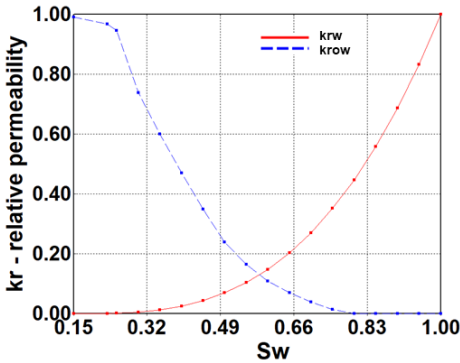
Fig. 8. Grid system and well location for SAGD.

Table 1. Reservoir properties for simulation model

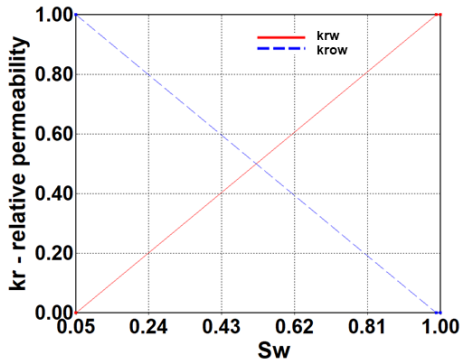
	Parameter	Value
Reservoir	Initial pressure, kPa	1,000(@300 m)
	Initial temperature, °C	12
Matrix	Porosity	0.3
	Horizontal permeability, md	500
	Vertical permeability, md	500
Fracture	Porosity	0.08
	Horizontal permeability, md	5,000
	Vertical permeability, md	2,500
	Spacing I / J / K, m	0.5 / 0.5 / 0.5
Thermal Properties	Volumetric heat capacity, J/(m <sup>3</sup> ·°C)	$2.6 \times 10^6$
	Thermal conductivity of rock, J/(m·day·°C)	$3.1 \times 10^5$
	Thermal conductivity of water, J/(m·day·°C)	$5.3 \times 10^4$
	Thermal conductivity of oil, J/(m·day·°C)	$1.2 \times 10^4$
	Thermal conductivity of gas, J/(m·day·°C)	$1.4 \times 10^2$

격자에는 닫힌 경계조건을 가정하였으며, 저류층 물성은 문헌 연구를 통해 Grosmont 층의 일반적인 특성 값으로 설정하였다(Table 1).

매질의 상대유체투과도는 Fig. 9(a)처럼 곡선을 사용하였으며, 균열의 상대유체투과도는 균열저류층에서 일반적으로 사용되는 선형으로 가정하였다(Fig. 9(b)). 저류층 유



(a)



(b)

Fig. 9. Relative permeability curves for (a) matrix (b) fracture.

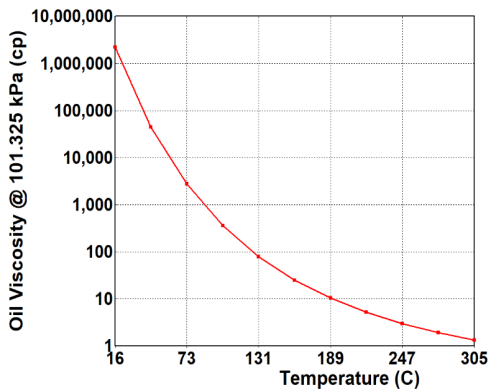


Fig. 10. Characteristics of bitumen viscosity to temperature.

체특성 중 온도에 따른 비튜멘의 점성도 변화는 생산에 가장 중요한 요소이다. Choi *et al.*(2011)은 캐나다 앨버타 지역 Athabasca 오일샌드와 탄산염암 비튜멘에서 추출한 지화학 분석결과, 서로 유사한 화학조성을 보인다고 하였다. 따라서 점성도는 Athabasca 오일샌드 물성을 참조하여 입력하였다(Fig. 10). 저류층 초기상태 조건일 때 비튜멘의 점성도는  $4.01 \times 10^6$  cp로 매우 크며, 온도가 증가함에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보인다.

SAGD 기법 운영조건으로 문헌 연구를 통해 주입압력은 3,500 kPa, 주입스팀의 온도는 242°C, 스팀품질(steam quality)은 0.9로 가정하였다. 스팀품질이란 주입유체 중 스팀(기체)의 비율을 의미하며 스팀을 만들기 위한 비용의 최소화 및 주입 과정에서의 열손실을 고려하여 일반적으로 90%의

Table 2. Simulation conditions of the SAGD process

	Constraints	Value
Injector	Max. steam injection pressure, kPa	3,500
	Max. water rate, m <sup>3</sup> /day	300
Producer	Min. bottom hole pressure, kPa	1,000
	Max. liquid rate, m <sup>3</sup> /day	450
	Max. steam rate, m <sup>3</sup> /day	2

Table 3. Case definition with respect to  $F_f$  and  $F_{mf}$

	Base model	Case 1	Case 2	Case 3
$F_f$	0.08	0.16	0.24	0.4
$F_{mf}$	0	0.5	0.67	0.8

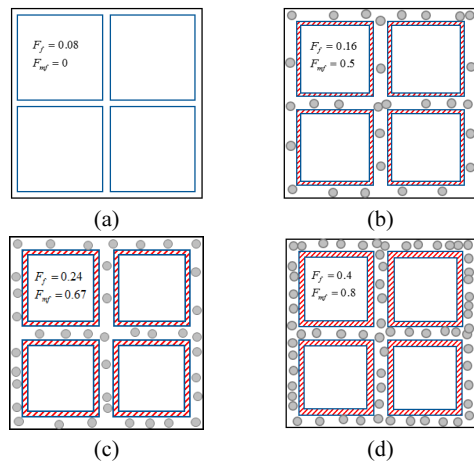


Fig. 11. Schematic of fractured reservoir modeling for (a) base model (b) case 1 (c) case 2 (d) case 3.

스팀과 10%의 물을 주입하는 것이 일반적이다. 주입정과 생산정의 간격은 5 m, 수평정의 길이는 800 m로 총 15년의 생산기간으로 설정하였다. Table 2에 주입정과 생산정의 운영조건을 제시하였다.

균열시스템의 특성변수 설정에 따른 SAGD 생산영향을 분석하기 위해 Table 3 및 Fig. 11과 같이  $F_f$  및  $F_{mf}$ 를 다양한 값으로 설정하였다. Fig. 11(a)는 기본모델로서  $F_{mf} = 0$  즉, 균열시스템에 암체가 포함되지 않은 경우로, 이때  $F_f$ 는 균열의 유효공극률은 0.08과 같게 된다. Fig. 11(b)는 Case 1로 균열시스템 내 매질 포함비율이 0.5이며  $F_f = 0.16$ 인 경우이다. Fig. 11(c)와(d)는 균열시스템 내 매질 포함비율이 각각 0.67 및 0.8로 더 높은 값을 가지는 경우이다. 이때  $F_f$

는 각각 0.24 및 0.4로 결정된다.  $F_f$  비율이 높을수록 전체 부피 중 균열시스템으로 분류되는 비율이 높아지는 것을 의미하고  $F_{mf}$  비율이 높을수록 균열시스템 내에 포함되는 총 매질의 비율이 높은 것을 나타낸다. 그러나 이 모든 경우에 균열만의 유효공극률은 식 (3)에 의해 0.08로 동일하게 유지된다. STARS에서는 ‘FRFRAC’과 ‘FORMINFRAC’ 키워드로  $F_f$ 과  $F_{mf}$  값을 반영하였다.

### SAGD 시뮬레이션 결과

#### DP & DK 모델 시뮬레이션 비교분석

Fig. 11(a)의 기본모델을 사용하여 DP와 DK 모델에 대

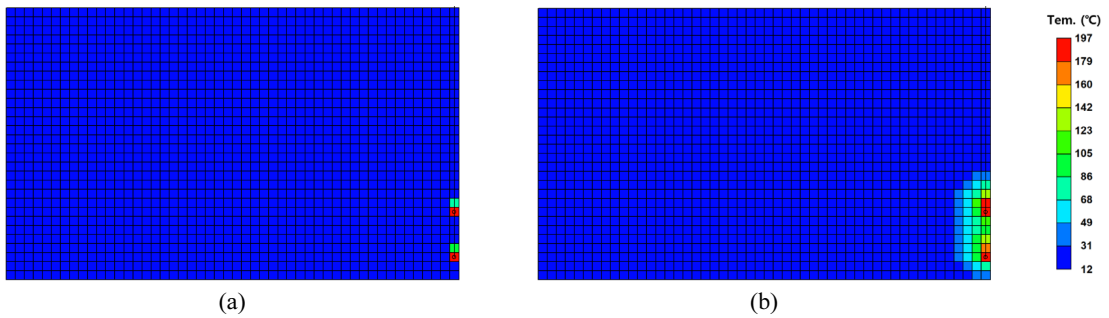


Fig. 12. Comparison of temperature distribution after 3 month-preheating period (a) DP model (b) DK model.

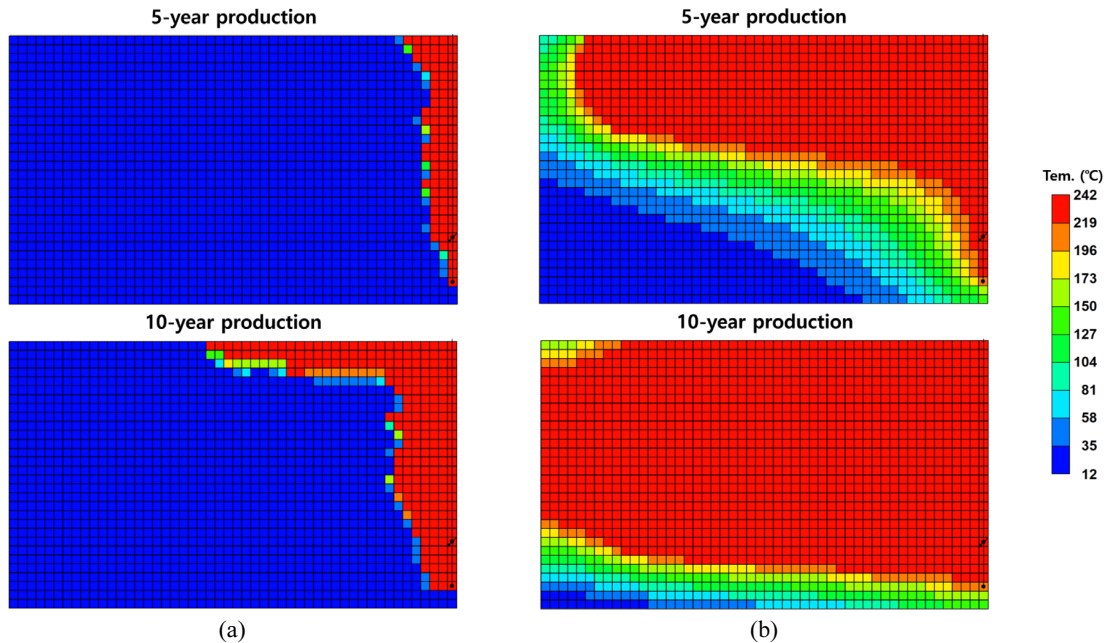


Fig. 13. Comparison of temperature distributions after 5 and 10-year production (a) DP model (b) DK model.

한 SAGD 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 먼저 생산정과 주입정 사이의 열 유통이 가능하도록 두 시추정에 전기히터를 설치하여 열전도에 의해 주변 온도를 높이는 과정을 적용하였다. Fig. 12는 3개월간의 예비가열을 적용한 후 온도분포를 나타낸 것이다. DK 모델은 시추정이 지나는 매질 및 균열 격자에 대해 히터에 의한 직접적인 열전도가 허용되기 때문에 많은 열이 전도되는 것을 예상할 수 있으며 약 3개월의 예비가열 기간을 적용한 결과 두 시추정 사이의 주변온도가 103°C까지 증가하여 열유통이 순조롭게 이루어졌다. 반면, DP 모델은 열의 유입이 균열을 통해서만 가능하기 때문에 열의 총 유입량이 제한되어 시추정 사이의 영역에 대해 실질적인 열전도가 이루어지지 않은 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 5년 및 10년 생산 후의 두 모델에 대한 스팀챔버의 온도 분포를 나타낸 것이다. 두 모델 모두 스팀과 비튜멘의 밀도 차이에 의해 투과도가 높은 균열을 따라 상승한 이후 스팀챔버가 상부에서부터 수평방향으로 성장하는 모습을 보였다. 그러나 스팀챔버 확장 영역에 대해서는 매우 큰 차이를 보였다. DP 모델은 주입되는 총 열량의 제한 및

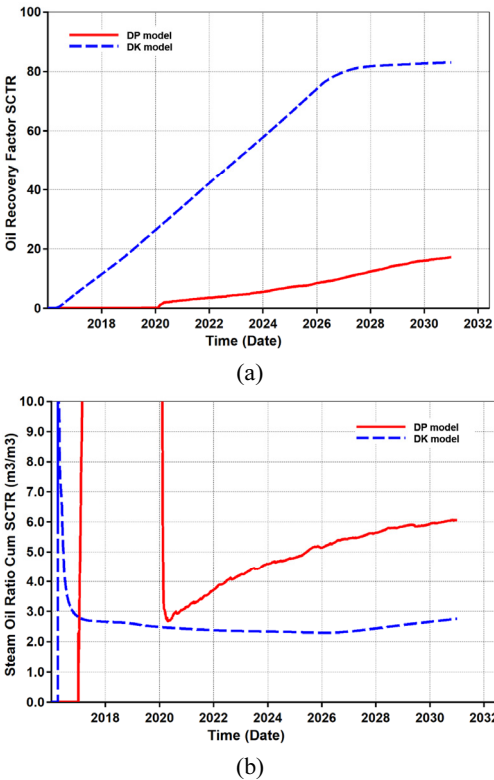
균열시스템의 낮은 열전도도로 인해 외부로의 확장이 매우 느리며, 스팀챔버의 외부경계의 온도변화가 계단함수 형태처럼 급격하게 나타났다(Fig. 13(a)). 반면, DK 모델의 경우에는 암체를 통한 보다 많은 열을 주변으로 전달할 수 있기 때문에 Fig. 13(b)와 같이 스팀챔버가 매우 넓게 확장하였으며, 외부 경계에서도 넓은 지역에 걸쳐 온도의 점진적 변화가 나타났다.

15년 동안 SAGD 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 14에 비교하였다. DP 모델에서는 약 4년이 지나야 처음 생산이 이루어 졌으며 총 회수율은 약 17%를 보였다. DK 모델의 경우에는 열유통이 원활히 형성되어 초기부터 생산이 진행되었으며 총 회수율은 83%에 이른다(Fig. 14(a)). SAGD 기법의 효율성은 누적스팀오일비(cSOR)를 통해 알 수 있다. Fig. 14(b)는 누적스팀오일비를 표시한 것으로 DP 모델의 경우에는 생산초기에는 3 정도의 값을 보이지만 즉시 증가하여 6에 이르는 양상을 보이는 반면, DK 모델은 2~3 내에서 비교적 안정적인 수치를 유지하였다.

**SAGD 예비가열 기간 최적화**

저류층 온도조건에서 유동성이 거의 없는 비튜멘을 SAGD 기법으로 생산하기 위해서는 생산정과 주입정 주변의 암체 및 균열에 존재하는 비튜멘을 유동성 있게 만들어야 한다. 일반적으로 오일샌드 저류층 모델에서 수행되는 예비가열 기간은 보통 3개월로 알려져 있다. DK 모델과는 달리 DP 모델은 통상적인 예비가열 기간만으로는 열 유통이 이루어지지 않기 때문에 이 절에서는 Table 3에 정의된 모델들에 대해 DP 모델에서 열유통이 일어나는 최적의 예비가열 기간을 분석하였다. 최적의 예비가열 기간이란 생산이 바로 가능하도록 가열하는 기간으로 정의하였다.

Fig. 15는 3개월 동안 예비가열 후 온도분포를 나타낸 것이다.  $F_f$ 가 클수록 주변 암체 및 균열에 열전달이 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다. 최적 예비가열 기간을 결정하기 위해 예비가열 기간에 따라 첫 생산이 이루어지는 시점을 분석하여 Fig. 16에 나타내었다. 그림에서 가로축은 예비가열 기간이며, 세로축은 처음으로 오일이 생산되는 시점을 의미한다. 예비가열 기간과 첫 생산이 이루어지는 시점이 동일한 지점에서 최적 예비가열 기간이 결정된다. 기본모델인 경우는 시뮬레이션 시 수렴오차가 빈번히 발생하여 제외시켰다. Table 4에 최적 예비가열기간을 정리하였다. 그 결과 case 1~3에 대해서 각각 8, 5, 그리고 3 개월로 나타났다. 즉, 최적의 예비가열기간은  $F_f$  값이 커질수록 짧게 나타났다. 이는  $F_f$ 가 커질수록 전체 저류층 중 균열시스템으로 간주되는 비율이 증가하여 스팀 주입 시 균열시스템으로 유입되는 열의 양이 상대적으로 많고,  $F_{mf}$ 가 커지면서 균열시스템의 열전도도가 증가하기 때문이다.



**Fig. 14.** Comparison of DP & DK model simulation after 15-year production (a) R.F. (b) cSOR.



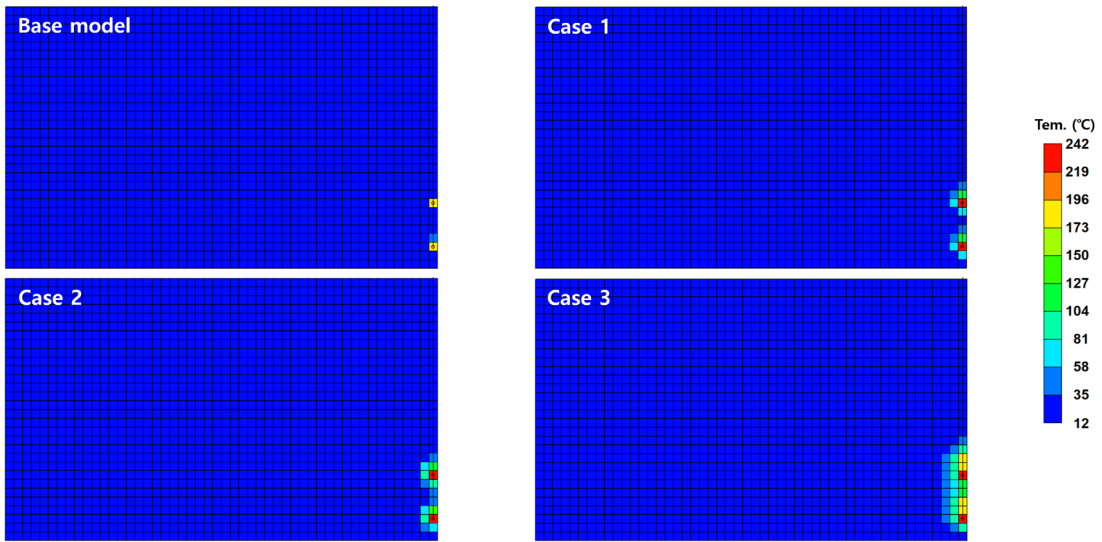


Fig. 15. Comparison of temperature distribution after 3-year preheating for each case.

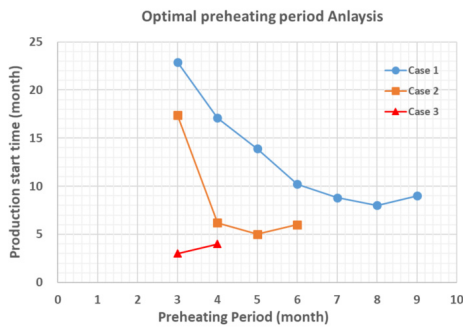


Fig. 16. Optimal preheating period for various  $F_f$  in DP model.

Table 4. Summary of optimal preheating period

	Base Model	Case 1	Case 2	Case 3
Preheating period	-	8	5	3

**균열시스템 특성변수의 영향분석**

DK 모델은 균열시스템과 매질시스템 모두에서 유동 및 열전달이 가능하기 때문에 균열시스템 특성변수를 고려하더라도 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 확인되었다. Fig. 17은 기본모델과 case 3에 대해 DK 모델을 적용한 결과이다. 회수율과 cSOR 모두에서 차이가 매우 미미한 것을 볼 수 있다.

다음은 DP 모델을 적용하여 Table 3에 제시한 균열시스템 특성변수에 대해 SAGD 시뮬레이션을 수행하였다. 이때, 최적 예비가열 기간을 적용하여 열 유통을 실시하였다. Fig. 18은 각 경우에 대해 2, 5, 10, 그리고 15년 생산 후 저류층의 온도분포를 비교한 것이다. 기본모델은 2년 후까지 아직 열유통이 이루어지지 않았으며, 5년 후에는 상부까지 스팀챔버가 수직으로 형성된 후 상부에서 수평방향으로 확장되는 것을 볼 수 있다. 특이사항은 15년 생산 후 스팀챔버 왼쪽에 비 정상적인 온도분포가 나타나는데 이는 시뮬레이션의 오차가 누적된 결과로 분석된다. 실제 기본모델에서는 시뮬레이션 수행 중 해의 수렴이 잘 이루어지지 않는 현상이 빈번하게 발생하였다.

Case 1에서 3으로 갈수록 기본모델보다 안정적인 스팀 챔버 발달양상이 나타났고,  $F_f$ 가 증가하면 스팀챔버가 외부로 더 넓게 확장하는 것을 볼 수 있다. 이는 스팀 유입이 상대적으로 많이 이루어진 결과이며 스팀챔버 외부경계에서 완만한 온도구배도 관찰된다.  $F_f$ 가 클수록 Fig. 13(b)의 DK 모델 결과와 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 19는 15년 동안의 회수율 및 누적 스팀오일비를 비교한 것이다. Case 1~3 모델의 회수율은 약 58~63%까지 이르지만, 기본 모델은 18% 정도밖에 되지 않았다(Table 5). SAGD 기법의 효율성은 Fig. 19(b)의 누적 스팀오일비를 통해 확인 가능하다. 기본 모델은 스팀챔버가 형성된 후 cSOR 값이 3이하로 감소하지만, 급격히 증가하여 6보다 큰 값을 보인다. Case 1~3 모델의 경우 cSOR 값은 처음 10년 동안 2와 3 사이를 유지하다가 그 후 약 3.5까지 증가한

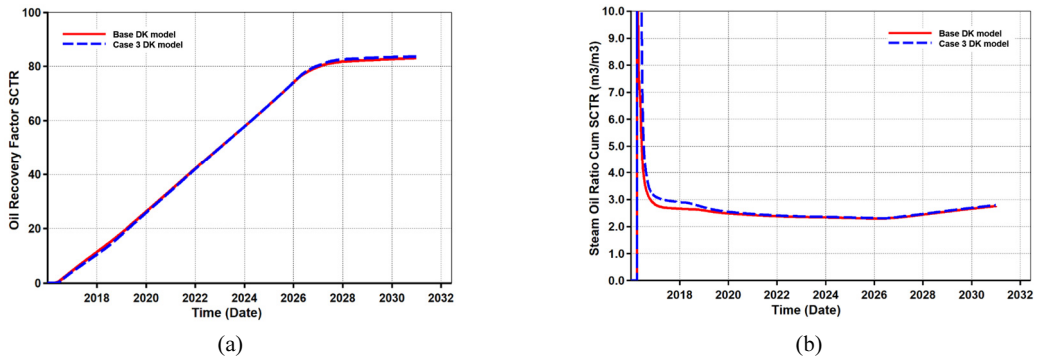


Fig. 17. Comparison of SAGD results for DK model (a) R.F. (b) cSOR.

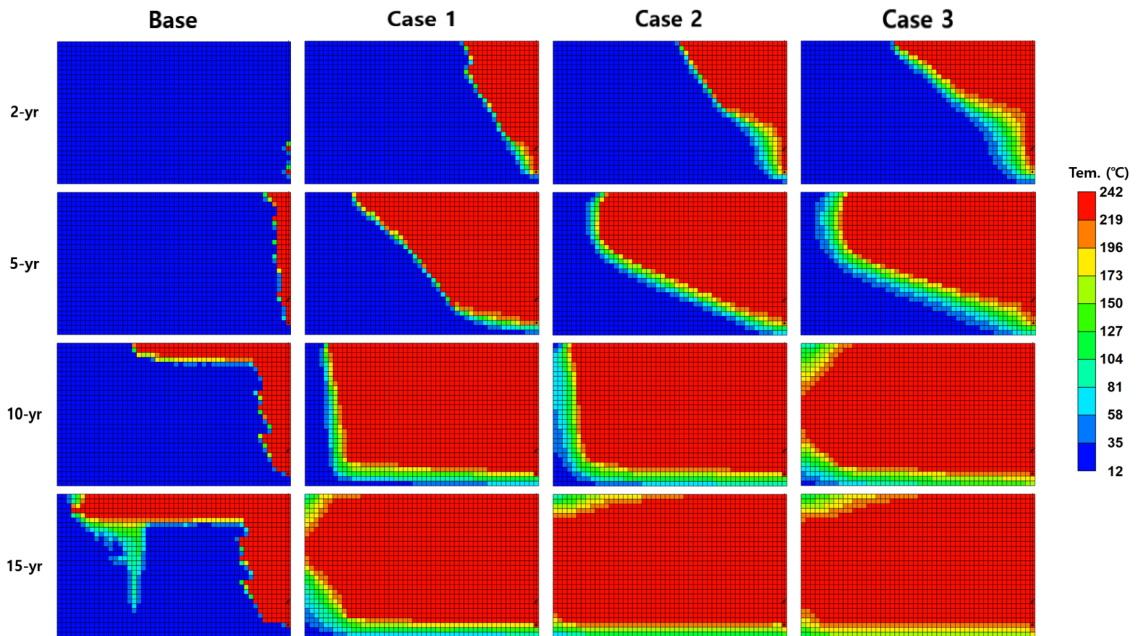


Fig. 18. Comparison of the steam chambers for various cases.

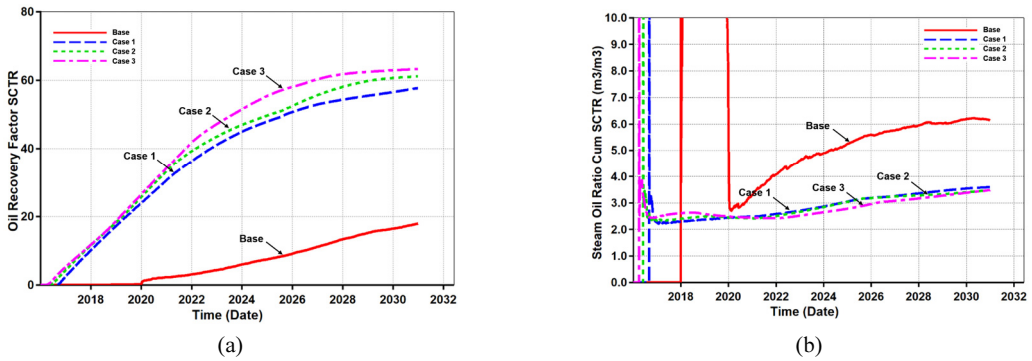


Fig. 19. Comparison of SAGD results for (a) oil R.F. (b) cSOR.

**Table 5.** Summary of SAGD in DP models after 15-year production

	Base Model	Case 1	Case 2	Case 3
Cum. prod., m <sup>3</sup>	56,463	180,423	190,506	197,197
R.F., %	18	57.7	61.1	63.2
cSOR, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	6.15	3.59	3.48	3.47

다. 회수율 추이를 고려할 때 생산성이 가장 좋은 10년 동안의 cSOR이 3 이하를 유지하므로 경제적 생산도 충분히 가능할 것을 판단된다. 따라서, 균열의 발생빈도가 높아 DP 모델이 적합한 경우 균열시스템 특성변수를 적용하면 더욱 현실적인 SAGD 시뮬레이션을 수행할 수 있으며 상황에 따라 경제성 있는 생산 시나리오도 충분히 가능한 것으로 사료된다.

## 결 론

본 연구에서는 캐나다 앨버타 북부에 위치한 Grosmont 탄산염 균열저류층의 암체와 균열의 특성을 모사하기 위해 균열 특성변수를 사용하여 SAGD 기법 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 균열 저류층을 모사하기 위해 사용되는 개념적 균열 모델링에 따라 SAGD 기법 적용 시 뚜렷한 차이가 발생하는 것으로 파악되었다. 균열시스템 특성변수를 고려하지 않은 기존 DP 모델은 균열시스템을 통해서만 시추정과 열 또는 유체의 주입/생산이 가능하기 때문에, 탄산염 균열저류층에서 SAGD 기법 적용 시 스팀챔버의 발달이 어렵고 회수율이 저조하게 나타났다. 암체 및 균열 시스템 모두에서 유체 또는 열유동이 가능한 DK 모델은 스팀챔버의 발달이 더 우수해 SAGD 기법 적용의 효율성이 더 좋게 나타났다.
2. 스팀 주입시 균열내의 작은 암체는 급히 온도가 올라가며, 큰 암체 표면도 순간적으로 스팀의 온도에 이르는 현상이 나타난다. 이러한 특징을 개념적 모델에 적용하기 위해 균열시스템 특성변수 즉, 전체 저류층 부피에 대한 균열시스템의 부피 비  $F_j$ 와 균열시스템 내 매질의 부피 비  $F_{mf}$ 를 고려한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, DK 모델에서는 균열시스템 특성변수의 영향이 거의 나타나지 않지만, DP 모델에서는 큰 차이를 보였으며  $F_j$ 이 커질수록 생산성이 좋아지고 DK 모델의 결과와 유사한 형태를 보였다.
3. 오일샌드 저류층에서는 3개월 정도의 예비가열로 두 수평정 사이에 있는 암체 및 균열 격자들의 온도가 상승하

여 유체유동이 일어날 수 있는 조건인 열유통이 이루어 지지만, 탄산염 균열저류층에서는 개념적 모델 종류와 균열시스템 특성변수에 따라 최적 예열기간이 달라짐을 확인하였다. DP 모델에서 균열시스템 특성변수에 따른 최적 예비가열 기간은 3개월에서 8개월 사이를 보였다. 또한, DP 모델의 SAGD 시뮬레이션 시 균열시스템 특성변수를 반영하지 않는 기본 모델에서는 스팀챔버의 형성과 확장에 제한이 많았으나,  $F_j$ 가 커질수록 스팀 챔버의 확장이 용이하고 이에 따른 오일 회수율은 58~63%, cSOR은 2~4의 범위로 나타났다.

4. 캐나다 Grosmont 코어 분석결과 균열의 발생빈도가 매우 높고 불균질하여 암체의 크기 분포도 매우 불균질하고 반복적으로 나타났다. 이와 같이 균열 발생빈도가 높은 탄산염 균열저류층에서 SAGD 모델을 적용하기 위해서는 균열을 통해서만 유동이 이루어지는 DP 모델이 더 적합한 것으로 판단된다. DP 모델 적용시 스팀주입에 의해 나타나는 현상을 보다 현실적으로 모사하기 위해서는 균열시스템 특성변수인  $F_j$ 와  $F_{mf}$ 를 고려하는 것이 타당하며, 경우에 따라 경제적 생산 가능성도 충분한 것으로 판단된다. 실제 탄산염 균열저류층에서 균열시스템 특성변수로 어떤 값을 설정해야 하는지는 추가적인 연구가 필요하지만, 생산자료에 대한 히스토리 매칭 시 주요 매칭변수로서 사용될 수 있다.

## 사 사

이 논문은 2015년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## References

- AERCB (Alberta Energy Resources Conservation Board), 2012. *Alberta's Energy Reserves 2011 and Supply/Demand Outlook 2012-2021*. ST98-2012, p.1-11.
- Choi, J., Kim, J.H., Kil, Y.W., Lee, S.D., and Park, M.H., 2011. Inorganic and Organic Geochemical Characteristics of Devonian Bitumen Carbonate in Alberta, Canada. *Econ. Environ. Geol.*, 44(1), 21-35.
- Choi, Y., Kim, Y., Kam, H., Shin, K., Jun, J., and Jang, I., 2014. Simulation Study of the SAGD for the Carbonate Reservoir Model Incorporating Fracture Characteristics of Grosmont Formation, Canada. *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, 51(4), 549-562.
- CMG, 2016. *CMG STARS User Guide, Advanced Processes & Thermal Reservoir Simulator*, Computer Modeling Group Ltd., Calgary, 1450p.

- Das, S., 2007. Application of Thermal Recovery Processes in Heavy Oil Carbonate Reservoirs. *SPE 105392 presented at the 15th SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*, SPE, Bahrain, p.1-9.
- Ezeuko, C.C., Kallos, M.S., and Gates, I.D., 2013. Object Characterisation and Simulation of Thermal Recovery from Karstified, Brecciated and Fractured Bitumen Carbonate Reservoirs. *IPTC 1680 presented at International Petroleum Technology Conference*, China, IPTC, p.1-10.
- Lee, W., Lee, Y., and Sung, W., 2009. Sensitivity Studies on Thermal Parameters of Carbonate Heavy Oil Reservoir. *J. Korean Soc. Geosystem Eng.*, 46(4), 466-473.
- MKE, 2011. *3D geological structure construction technology development of Unconventional carbonate oil field*, Ministry of Knowledge Economy, Korea, 219p.
- Qi, J. and Yuan, J.Y., 2013. History Matching Grosmont C Carbonate Thermal Production Performance. *SPE 165560 presented at the SPE Heavy Oil Conference*, SPE, Canada, p.1-10.
- Sola, B.S. and Rashidi, F., 2006. Application of the SAGD to an Iranian Carbonate Heavy-Oil Reservoir. *SPE 100533 presented at the SPE Western Regional/AAPG Pacific Section Joint Meeting*, SPE, Alaska, p.1-6.
- Surmont Energy Ltd., 2017.08.08., <http://surmontenergy.com/operations>.



### 나 주 환

2015년 조선대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학사  
2017년 조선대학교 대학원 에너지자원공학과 공학석사

현재 조선대학교 에너지자원공학과 박사과정  
(E-mail: juhwan\_na@chosun.kr)

---



---

### 장 일 식

현재 조선대학교 에너지자원공학과 조교수  
(本學會誌 第52卷 第6号 參照)

---