

# 고온 고압 스팀을 주입하는 SAGD 공정에서 FeO<sub>x</sub> 무기첨가제가 오일샌드 회수율에 미치는 영향

송병진<sup>\*,\*\*</sup> · 유난숙<sup>\*</sup> · 김지만<sup>\*\*</sup> · 이철위<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>한국화학연구원 그린화학공정연구본부, <sup>\*\*</sup>성균관대학교 화학과  
(2013년 10월 25일 접수, 2013년 12월 2일 심사, 2013년 12월 17일 채택)

## Effect of FeO<sub>x</sub> Inorganic Additive in SAGD Process for Oil Sand Recovery

Byung Jin Song<sup>\*,\*\*</sup>, Nansuk You<sup>\*</sup>, Ji Man Kim<sup>\*\*</sup>, and Chul Wee Lee<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>Division of Green Chemistry & Engineering Research, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT),  
Daejeon 305-600, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Chemistry, Sungkyunkwan University, Gyeonggi-do 440-746, Korea

(Received October 25, 2013; Revised December 2, 2013; Accepted December 17, 2013)

박층의 오일샌드에서 비투멘 성분 회수를 위한 steam assisted gravity drainage 공정에서 무기첨가제 도입에 따른 오일 회수율 특성을 평가하고자 실험실 규모의 모사장치를 이용하여 모사된 오일샌드에서 오일성분을 회수하는 실험을 수행하였다. 오일샌드 모사를 위해 비투멘과 성질이 유사한 초중질유와 직경 1.5 mm의 글래스비드를 사용하였다. 무기합성법을 통해 FeO<sub>x</sub>를 제조하여 무기첨가제로 도입하였다. 그 결과 시간에 따른 스팀의 열전달 속도는 무기첨가제 도입에 따라 약 40% 증가하였으며, 회수율 또한 약 30% 증가하였다.

Lab scale simulated steam assisted gravity drainage (SAGD) process devices were used to investigate the effect of inorganic additives for the bitumen recovery from oil sand. An extra heavy oil similar with bitumen and 1.5 mm diameter of the glass bead instead of clay was mixed to simulate the oil sand. In addition, FeO<sub>x</sub> synthesized from the inorganic process was introduced as an inorganic additive for improving the recovery. Finally, the steam heat transfer rate of approximately 40% following the introduction of inorganic additives which also increased the recovery rate by about 30%.

**Keywords:** oil sand, steam assisted gravity drainage, bitumen, unconventional oil

### 1. 서 론

최근 기존의 원유 생산은 매장량의 한계와 세계적으로 증가하는 석유 소비로 인해 감소하고 있다. 기존 석유의 대체 자원으로서 초중질유, 오일샌드, 비투멘 등과 같은 비재래형 석유 자원이 주목받고 있으며 이에 따른 다양한 연구가 진행 중이다[1].

오일샌드는 비투멘, 모래, 물, 점토의 혼합물로서 오일샌드가 석유로서의 의미를 갖는 것은 비투멘을 함유하고 있기 때문이며, 비투멘은 검은색의 무겁고 끈적끈적한 형태의 점성질 원유로 초중질원유로 분류된다[2,3].

오일샌드로부터 비투멘을 회수하는 대표적인 공정은 SAGD (steam assisted gravity drainage)가 있다. SAGD는 Butler에 의해 개발되었으며

오일샌드 시추현장에 성공적으로 적용되었다. SAGD 공정의 원리 중 핵심은 점도가 높은 비투멘에 관련한 문제를 해결한 것인데, 스팀 주입에 의해 생성된 스팀챔버는 비투멘의 점도를 낮추어 이동성을 갖게 하여 지상으로 이동이 가능하게 된다[4,5].

오일샌드 중 원유성분인 비투멘이 고점도를 갖는 이유는 크게 두 가지로 알려져 있다. 첫째, 비투멘은 15~20%의 아스팔텐 성분을 포함한다. 아스팔텐은 극성이 강한 지방족 탄화수소의 사슬구조 및 방향족 고리형태로 구성되어 있으며, 높은 분자량으로 인하여 함량이 증가하면 점도가 높아지는 특성이 있다[6].

둘째, 비투멘 내의 아스팔텐은 수소결합과 δ-결합의 오버랩을 통해 레진성분 구조의 극성작용기와 상호작용으로 콜로이드 응집현상이 발생되기 때문이다[6].

상기의 이유로 인하여, 비투멘은 고점도의 특성을 갖기 때문에 SAGD 공정에서 비투멘의 점도를 낮추는 동시에 흐름성을 부여하여 회수율을 증진시키기 위한 다양한 연구가 진행 중이며, 고온, 고압의 스팀을 주입 및 유기용매, 가스, 촉매와 같은 다양한 첨가제를 사용하는 공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

첨가제를 사용한 공법연구의 한 예로 수직형 스팀 주입(steam injection) 장치를 사용하여 수소를 제공하는 물질(tetralin, C<sub>10</sub>H<sub>12</sub>)과 유기금속

† Corresponding Author: Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT)

Division of Green Chemistry & Engineering Research  
100 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea  
Tel: +82-42-860-7381 e-mail: chulwee@kRICT.re.kr

물질( $Fe(CH_3COCHCOCH_3)_3$ )을 스팀과 동시에 주입시켜 반응한 결과가 Daulat D. Mamora의 연구그룹에 의해 발표되었다. 5 wt% 테트라린(tetralin)을 스팀과 동시에 주입하면, 스팀을 단독으로 주입하는 것에 비하여 오일 회수율이 약 15% 증진되었고, Fe가 혼합된 테트라린(tetralin) 용액을 오일샌드와 혼합하여 스팀을 주입하면, 스팀을 단독으로 주입하는 것에 비하여 오일 회수율이 약 20% 증진되었음을 보고하였다[8].

Peter K. Kilpatrick의 연구그룹에서는 무기 미립자가 물-오일(water-oil) 계면에서 아스팔텐과의 상호작용(흡착)으로 인하여 물-오일(water-oil) 에멀션의 계면장력을 약화 시킬 수 있도록 여러 종류의 친수성 무기 입자를 대상으로 에멀션의 계면장력에 영향을 주는 요인을 연구한 결과를 발표하였다[6].

따라서 본 연구에서는 SAGD 공정으로부터 비투멘의 회수율을 향상시키고자 실제 오일샌드 매립광구에 적용 시 원료공급이 원활하고 경제적이며, 대량합성이 용이한  $FeO_x$ 를 제조하여 무기첨가제로 사용하였다. SAGD 공정은 150 : 1로 축소된 Lab scale의 모사장치를 이용하였으며, 초중질유와 글래스비드의 혼합물을 제조하여 오일샌드 모사재료로 사용하였다. 또한 스팀 주입에 따른 내부 온도 변화 및 오일 회수율을 측정하여  $FeO_x$  무기첨가제 도입에 따른 SAGD 공정의 회수율 특성을 확인하였다.

## 2. 실험

### 2.1. $FeO_x$ 무기첨가제 제조

본 연구에서는 SAGD 공정의 비투멘 회수율 향상을 위한 첨가제로서 산화철을 제조하기 위하여  $FeNO_3$ 를 산화철의 전구체로 사용하였다. 또한 urea 및 올레인산은 산화철 제조 시 입자형성을 위한 첨가제로 사용하였다.

### 2.2. SAGD 공정 모사장치 구성 및 실험 방법

본 실험에서 사용한 SAGD 모사장치의 구조와 상세한 작동 방법 및 시료의 물성 분석결과 등은 본 연구그룹에서 2010년 한국화학공학회 영문지에 게재한 논문에 상세하게 소개되어 있다[7]. Cylinder model 이하 CM을 이용하여 오일샌드에서 오일을 회수하는 방법은 다음과 같다.

전체 부피가 약 6500 mL의 실린더 타입 모델의 70%인 약 4500 mL에는 오일샌드의 모래와 자갈 등의 역할을 하는 직경 1.5 mm의 글래스비드가 채워지고, 나머지 30%인 1948.5 mL의 81%는 비투멘과 유사한 초중질유로 채워지며, 19%는 물이 채워진다.

이때, 본 실험은 무기첨가제를 이용한 실험으로서, 위와 같은 실험 조건에 초중질유 대비 실험실에서 제조한 무기첨가제( $FeO_x$ ) 10%를 함께 첨가하였다. 또한 무기첨가제의 영향을 비교하기 위해서 무기첨가제를 도입하지 않은 실험도 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 무기첨가제 도입에 의한 SAGD 공정에서 Steam의 열전달 효율

Steam을 제조하기 위하여, 증류되지 않은 일반 상수도를 Steam generator에서 200 °C, 4000 s 동안 가열하였으며, Steam 생성 후 CM으로 주입하였다. 생성된 steam은 안정적인 온도(180 °C)를 유지하며 총 8000 s 동안 주입되었다. 이때, Steam 주입에 의해 CM 내부온도가 180 °C로 유지되는 시작 시간은 steam 주입 후 약 1500 s 이상이었다.

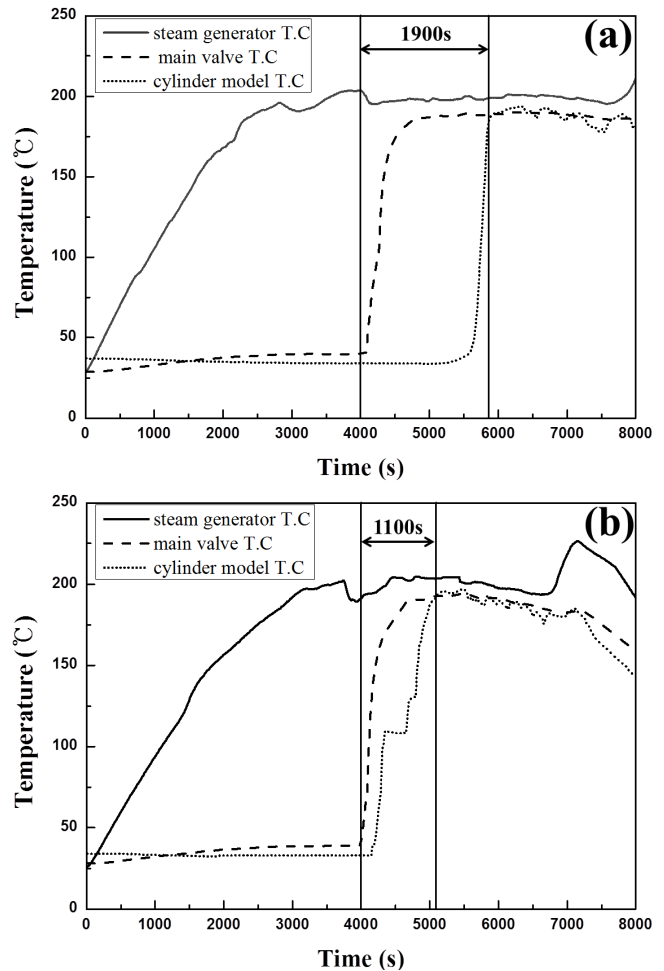


Figure 1. Variation of temperature as a function of time during SAGD operation in the absence (a) and presence (b) of inorganic additive.

이에 비해 무기첨가제 도입된 경우 steam 주입 후 약 800 s 이후 CM 내부온도가 180 °C로 유지되어 steam만 주입한 경우에 비해 약 700 s의 빠른 열전달 효과를 나타내었으며 Figure 1에 도시하였다.

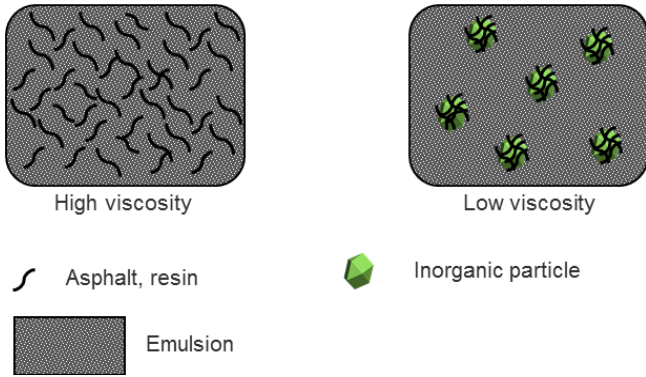
### 3.2. 무기첨가제 도입에 의한 SAGD 공정의 회수율

Steam 주입시간에 따른 오일 회수율에 대한 결과를 Table 1에 나타내었다. Steam만을 단독으로 주입하였을 경우와 무기첨가제를 도입한 경우 각각 cSOR (cumulative steam to oil ratio)은 9.3, 5.4의 값을 나타내었으며, 오일은 각각 37.8%, 68%가 회수되었다. 무기첨가제 도입에 따라 물-오일 에멀션의 계면에 위치한  $FeO_x$  표면에 아스팔텐-레진 응집체가 흡착되어 에멀션의 계면장력을 감소시킴으로써 물-오일 에멀션의 점도가 낮아져 열전달 속도가 향상되어 cSOR 및 오일 회수율이 향상된 것으로 판단된다. 무기첨가제가 아스팔텐-레진 응집체와 상호작용을 이해할 수 있는 모식도를 Figure 2에 도시하였다.

위와 같은 결과는 다른 연구그룹들이 오일샌드에서 비투멘 성분의 회수율을 향상시키기 위해서 다양한 첨가제들을 적용하였을 경우와 마찬가지로 회수율의 상승효과를 보였다.

**Table 1. Recovered Amount of Water and Extra Heavy Oil and cSOR**

Method	SAGD		Inorganic additive introduced SAGD	
	Water (mL)	Extra heavy oil (mL)	Water (mL)	Extra heavy oil (mL)
Recovered amount (Total)	2330	250	2450	450
cSOR		9.3		5.4
Oil recovery (%)		37.8		68



**Figure 2. Inorganic additives and the interaction of asphaltenes.**

#### 4. 결 론

본 연구에서는 오일샌드에서 비투멘 회수를 위한 SAGD 공정의 회수율을 향상시키고자 FeO<sub>x</sub> 입자를 제조하여 무기첨가제로 사용하여 회수율의 변화를 확인하였다.

1) 무기첨가제를 활용한 SAGD 실험에서는 스팀을 단독으로 사용하는 SAGD보다 CM에 열전달이 빠르게 진행되는 것을 확인하였다.

2) 그 결과 스팀을 단독으로 사용하는 SAGD의 경우 9.32, 무기첨가제를 활용한 SAGD 실험의 경우 5.44의 cSOR을 얻을 수 있었으며 회수율 또한 무기첨가제를 활용한 SAGD 실험이 스팀을 단독으로 사용한 SAGD보다 약 30% 향상됨을 확인하였다.

3) 이러한 결과는 무기첨가제의 입자가 아스팔텐과의 상호작용으로 에멀션의 안정도를 증가시켰으며 그 결과 초중질유의 점도가 쉽게 낮아지면서 흐름성의 향상을 가져왔다고 사료된다.

4) 또한 무기첨가제에 의해서 열전달이 빨라지면서 더 빠르고 경제적인 오일 회수율의 결과를 보여주었다.

#### 감 사

본 연구는 미래창조과학부/산업기술연구회 융합연구사업의 지원으로 수행되었음(과제번호 : B551179-12-07-00).

#### 참 고 문 헌

1. I. D. Gates and N. Chakrabarty, Design of the Steam and Solvent Injection Strategy in Expanding-Solvent Steam-Assisted Gravity Drainage, *J. Can. Pet. Technol.*, **47**, 40-49 (2008).
2. Y. K. Park, W. C. Choi, S. Y. Jeong, and C. W. Lee, High Value-added Technology of Oil Sand, *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**, 109-116 (2007).
3. R. M. Butler, A New Approach to the Modeling of Steam-Assisted Gravity Drainage, *J. Can. Pet. Technol.*, **24**, 42-51 (1985).
4. R. M. Butler, Thermal recovery of oil and bitumen, 285, Prentice Hall Inc., New Jersey, USA (1991).
5. K. Sasaki, S. Akibayashi, N. Yazawa, Q. T. Doan, and S. M. Farouq Ali, Experimental Modeling of the SAGD Process - Enhancing SAGD Performance with Periodic Stimulation of the Horizontal Producer, *SPE. J.*, **6**, 89-97 (2001).
6. A. P. Sullivan and P. K. Kilpatrick, The Effects of Inorganic Solid Particles on Water and Crude Oil Emulsion Stability, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 3389-3404 (2002).
7. N. S. You, S. H. Yoon, W. K. Lee, H. Y. Lee, S. Y. Park, J. H. Shim, J. S. Kim, and C. W. Lee, Design, construction and operation of lab scale cylindrical steam assisted gravity drainage model for heavy oil recovery, *Korean J. Chem. Eng.*, **27**, 1718-1724 (2010).
8. A. A. Mohammad and D. D. Mamora, Insitu Upgrading of Heavy Oil Under Steam Injection With Tetralin and Catalyst, *SPE. J.*, **10**, 2118-2129 (2008).