

오일샌드 고부가가치기술 동향

박용기 · 최원춘 · 정순용 · 이철위[†]

한국화학연구원 석유대체연구센터
305-600 대전시 유성구 장동 100
(2007년 1월 18일 접수, 2007년 3월 2일 채택)

High Value-added Technology of Oil Sand

Yong-Ki Park, Won Choon Choi, Soon Yong Jeong and Chul Wee Lee[†]

Alternative Chemicals/Fuel Research Center, KRICT, P.O. Box 107, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea
(Received 18 January 2007; accepted 2 March 2007)

요 약

기존의 경질유가 고갈됨에 따라 새로운 자원개발이 필요해지고 있다. 석유화학산업의 수요를 충족하기 위하여 중질유 혹은 비투멘 등과 같은 중질원료를 사용하고 있다. 비투멘은 복잡하고 고리가 긴 탄화수소의 일종으로 오일샌드로부터 얻을 수 있는데, 캐나다 앨버타에 매장되어 있는 오일샌드로부터 약 8,300억 배럴의 오일을 얻을 수 있는 것으로 추정된다. 본 논문에서는 (1) 오일샌드, 비투멘, 중질유의 기본 개념, (2) 오일샌드에서 오일을 뽑아내는 방법들, (3) 업그레이드하여 합성원유(synthetic crude oil)를 만드는 방법, (4) 기술의 경제성 평가 등에 대하여 소개하고자 한다.

Abstract – As conventional light oil resources deplete, it is becoming necessary to develop unconventional resources. To meet the demand for petrochemical industry, heavier sources such as heavy oil and bitumen are being utilized. Bitumens, a complex hydrocarbon made up of a long chain of molecules, are found in oil sand. It is estimated that 830 billion barrels of oil are located in the oil sand in Alberta, Canada. This paper will review briefly (1) the basic concept of oil sand, bitumen, and heavy oil, (2) methods how to extract oil from oil sand, (3) methods how to upgrade to synthetic crude oil, and (4) economic evaluation of technology.

Key words: Oil Sand, Bitumen, Heavy Oil, Upgrading, Synthetic Crude Oil

1. 오일샌드(oil sand)란 무엇인가?[1]

오일샌드란 원유에 해당하는 비투멘(bitumen), 모래(quartz sand), 점토(clay), 물 및 미량의 미네랄로 이루어져 있는데 매장 위치에 따라 다소 성분이 다를 수 있으나, 75~85%의 무기물질(모래, 점토, 미네랄 등), 3~5%의 물과 1~18%의 비투멘으로 이루어져 있다. 오일샌드의 Moh's 강도는 7.4 정도 이다[1]. 오일샌드의 핵심 성분이며, 고부가가치가 가능한 비투멘은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 물로 포위되어 있기 때문에(encapsulated), 다른 성분들로부터 쉽게 분리할 수 있다. 자연에 매장되어 있는 비투멘은 점도가 높고, 무겁기 때문에 적절한 방법으로 끓히거나, 화학적인 방법을 사용하여 점도를 낮추어 수송관을 통하여 정제소(refinery)까지 이동시켜야한다. 이 비투멘 성분은 지역에 따라 1~18% 범위로 매장되어 있는데, 보통 6% 이하 비투멘을 함유한 오일샌드는 채굴하여도 경제성이 부족하고, 12%이상의 비투멘을 함유한 오일샌드가 경제성이 있다고 알려져 있다. 대개 채굴한 오일샌드 2 톤에서 1 배럴(159 리터)의 합성원유

(SCO, synthetic crude oil)를 생산할 수 있다. 이 비투멘은 천연에서 생성되는 점도가 높은 탄화수소의 혼합물(상온에서 물의 점도를 1 cp, 꿀의 점도를 3,000 cp, 토마토 켄첩의 점도를 50,000 cp로 보았을 때 비투멘의 점도는 최대 5,000,000 cp 정도)로서 API 값이 8~14° (물의 경우 약 10°)이고, 평균적으로 탄소 83.1%, 수소 10.1%, 산소 1.17%, 질소 0.56%, 황 5.14% 이외 미량의 메탄, 황화수소, 니켈, 철, 바나듐 등으로 이루어져 있어, 탄소의 함량이 상대적으로 매우 많은 것이 특징이다.

Fig. 2에는 캐나다 앨버타 지역의 지질 구조를 나타낸 것으로, 지하 수십~수백 미터에 매장되어 있는 오일샌드를 볼 수 있다.

오일샌드는 1973년 제1차 오일쇼크 이후 석유를 대신할 화석연료의 하나로 주목받게 되었다. 매장량의 대부분이 캐나다 앨버타주와 베네수엘라의 오리노코강 북쪽 연안에 있으며, 캐나다 앨버타주의 포트맥머리 주변에만 오일샌드 형태로 1,740억 배럴의 원유가 묻혀 있을 것으로 캐나다 정부는 예상한다(전 세계 최대 산유국인 사우디아라비아의 일반 원유 매장량은 2,640억 배럴 수준임). 한국이 한 해에 약 8억 배럴을 소비하니까 그 규모가 어느 정도인지 짐작할 수 있다. 오일샌드에서 비투멘을 뽑아 내려면 원유 1 배럴당

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: chulwee@kriict.re.kr

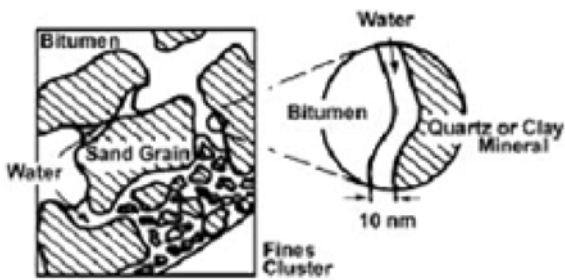


Fig. 1. The structure of oil sands.

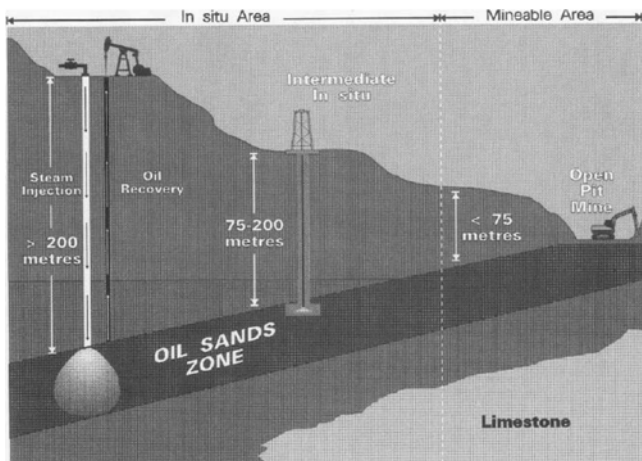


Fig. 2. The geological structure of oil sands resource.

약 20 달러의 비용이 필요해 그동안 방치되어 왔다. 오일샌드는 생산 방식에 따라 차이가 있지만 일반적인 유전 개발 보다 오일샌드 개발 비용이 2배 정도 이다. 하지만, 2005년 부터 고유가 시대가 본격적인 막이 올라 현재 70 달러를 육박하고 있자, 전세계적으로 오일샌드에 관심이 높아지고 있다.

샌드오일을 더운물로 처리하여 비투멘을 분리하고 소위 “합성원유(SCO, synthetic crude oil)”와 여타 석유화학 유도체를 만드는데, 이때 비투멘에서 탄소성분을 제거하거나, 수소를 첨가하거나, 혹은 질소나 황 등과 같은 불순물을 제거하게 된다. 이렇게 질이 좋아진(upgraded) 생성물을 “합성원유”라고 하며, 이는 자동차용으로 사용되는 합성석유와는 질적으로 다르다.

2. 오일샌드에서 비투멘 성분 뽑아내기[1]

2-1. 표면 채굴(surface mining): 추출(extraction)

1883년 Geological Survey of Canada의 G.C. Hoffman이 오일샌드로부터 더운물을 사용하여 비투멘을 분리하는 연구를 처음 시도한 이래[2], 지금까지 꾸준히 연구가 진행되고 있는데, 일반적인 절차는 아래와 같다.

2-1-1. 조건잡기(conditioning)

먼저 큰 덩어리의 오일샌드를 부수고 조잡한 불순물을 제거한 다음, 더운물과 혼합하여 수송관을 통하여 추출 플랜트로 보낸다. 이 piping system을 hydrotransport라 하는데, 이는 오일샌드 공정에서

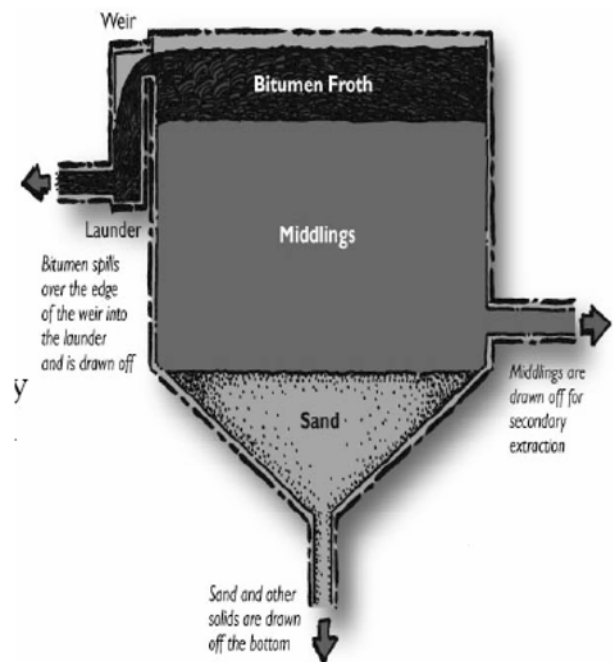


Fig. 3. The structure of PSV (primary separation vessel).

가장 흥미있는 새로운 발전기구이다. 이 hydrotransport는 경제적이고 효율적이어서, 광산과 추출 플랜트 사이의 기존의 수송시스템을 대신한다. 추출하는 곳까지 이동하는 동안 오일샌드의 조건잡기를 수행한다. Hydrotransport에서 사용하는 물은 conditioning drum 혹은 tumbler 보다 차가운 물을 사용하기 때문에 에너지 소모가 적다.

2-1-2. 분리(separation)

슬러리는 PSV(primary separation vessel)로 보내어져 세 개의 층(three layers)으로 침강(settle)되며, 분리를 좀 더 빨리 이루어지게 하기 위하여 더운물을 더 넣는다. 불순한 비투멘이 맨 윗층에 거품으로 뜨게 되고, 모래는 바닥에, 그리고 비투멘, 모래, 점토와 물이 중간 층에 자리잡게 된다. PSV는 아랫쪽에 깔리가 있어 샌드를 아래로 내려오게 하여 분리를 빠르게 이루어지게 한다(Fig. 3참조). 물과 혼합된 모래는 tailings ponds라는 곳으로 펌프로 이동시킨다.

2-1-3. 2차 분리

Middling은 점토, 모래 및 소량의 비투멘이 혼합되어 있는 슬러리인데 이는 2차 분리과정을 거치게 된다. 먼저 탱크속의 middling에 공기를 주입하면 비투멘 거품(froth)이 더 형성되는데 이로부터 약 2~4%의 비투멘을 회수할 수 있다. 이 과정에서 회수한 비투멘은 첫번째 분리시스템으로 되돌아 간다. 약 80 °C의 스팀을 넣어 과량의 공기방울을 제거한다. 이때 공기 거품은 펌프에 공동현상(cavitation)을 유발하므로, 펌프의 작동을 원활하게 하기 위하여 반드시 제거해야 한다.

2-1-4. 거품 처리(froth treatment)

비투멘 거품은 무게로 약 30%의 물, 10%의 고체(주로 점토)를 함유하고 있기 때문에 거품처리 플랜트 혹은 counter-current decantation vessel(Albian Sands)에서 세척하게 된다. 거품처리 플랜트에서는 납

사로 희석시켜 쉽게 흐르게 하여 inclined plate settler와 원심분리기를 거치게 된다. Inclined plate settler에서는 중력에 의해 입자가 가라 앉게 하고, 그 다음 원심분리를 하게 된다. 이때 두 종류의 원심분리 과정이 있는데, scroll 원심분리는 고체 덩어리를 스크루 콘베이어를 이용하여 기계 밖으로 조악한 입자를 분리하게 되고, disc 원심분리에서는 세탁기와 같은 방식으로 고운 입자 및 아주 작은 물방울을 밖으로 내보내는데 이 stream을 tailing으로 모은다. 이렇게 세척한(5% 이하의 물을 함유) 비투맨은 건조시켜 0.5% 이하의 미네랄을 갖게 만듦으로써, 추출과정이 종료된다. 이 더운물-추출 공정에서는 오일샌드에서 91% 이상의 비투맨을 회수하게 되어, 합성원유로 upgrade 할 단계에 이르게 된다.

2-2. In-situ technology

대부분의 in-situ 기술에서의 중요한 목표는 경제적인 방법으로 비투맨의 점도를 낮추어, 이동이 용이하게 만드는 일이다. 오늘날 상업적으로 사용되는 in-situ 기술은 CSS(cyclic steam stimulation), SAGD(steam assisted gravity drainage) 등이 있다. 현재 채굴법에 의한 비투맨 생산이 in-situ 생산법과 필적하지만, 향후 in-situ 법이 더 많아질 것이다.

CSS는 고압, 고온(약 350 °C)의 스팀을 오일샌드가 매장된 곳에 주입하면, 스팀 압력에 의하여 오일샌드 덩어리가 조각이 나고, 스팀의 고열에 의해 비투맨을 녹인다. 스팀은 매립지에 스며들어 가열된 비투맨이 흐르게되면 펌프질하여 지상으로 퍼올린다. 이 과정을 수 차례 반복하여 수개월 내지 2년 계속함으로써 CSS를 완성하게 된다(Fig. 4).

SAGD는 가장 일반적인 기술로서 표면 채굴에 의해 약 20%의 오일샌드를 회수할 수 있는 반면 약 80%는 SAGD 기술에 의하여 오일샌드를 회수하는 것으로 알려져 있다. SAGD는 두 개의 평행하고 수평적인 우물을 굴착하여, 상단의 우물에는 스팀을 주입하여 더운열을 발생시키고, 이로 인하여 점도가 높은 원유의 점도를 낮추게 하여 아래로 흘러 내려오게 하면 하단부에 위치한 우물에 고이

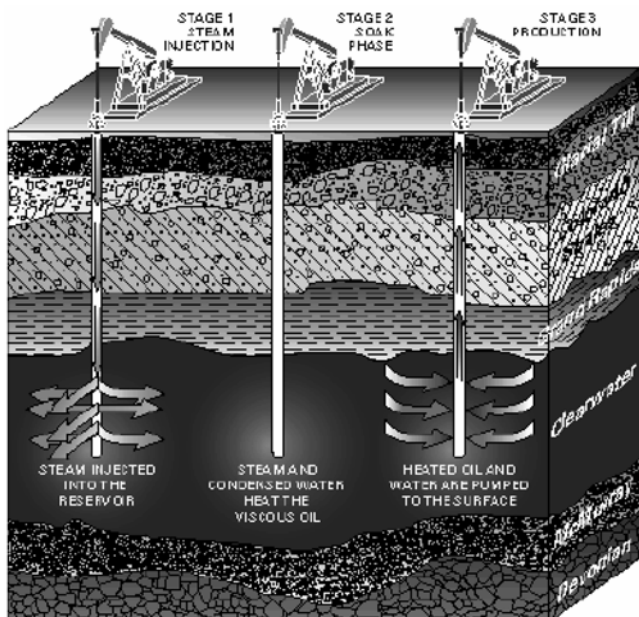


Fig. 4. The principle of CSS(cyclic steam stimulation).

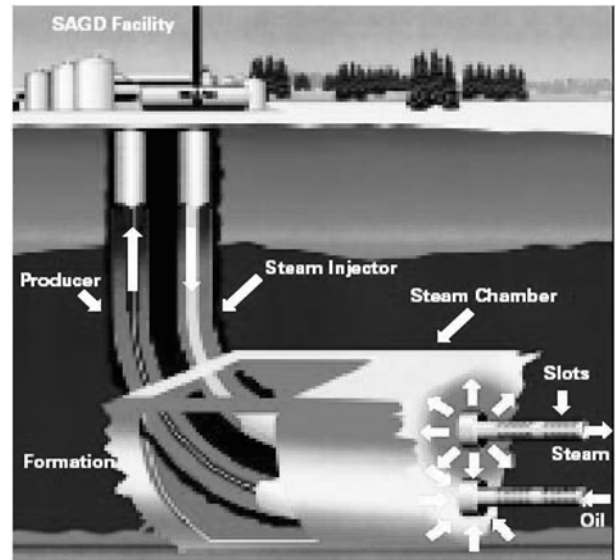


Fig. 5. The principle of SAGD (steam assisted gravity drainage).

게 한다. 이 점도가 낮아진 더운 원유는 지상으로 펌프질하여 퍼올리게된다(Fig. 5).

THAI(toe to heel air injection) 공정은 1960년대 개발된 기술로서, 원유 회수율이 우수하며, 투자비가 적고, 천연가스과 물 사용량이 적으며, 온난화가스 발생량이 적어, SAGD의 단점을 보강할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 이 공정은 더 깊은 지하에 매장되어 있으며, 질이 낮은 원료 지대에서도 사용이 가능하다.

VAPEX(vapor extraction process) 기술은 SAGD 기술과 유사하지만, 물대신 유기용매를 사용하여 오일샌드의 점도를 급격히 낮출 수 있는 특징이 있다. 에탄, 프로판 등과 같은 기화된 용매를 주입함으로써, 지하에 vapor-chamber를 형성할 수 있게 되고, 오일이 중력에 의해 아래로 쉽게 흘러내릴 수 있게 된다. 에너지 사용이 적은 것이 특징이다. 오일샌드에서 비투맨을 뽑아내는 기술은 아직도 개발의 여지가 많이 남아 있다.

오일샌드가 앞으로 대체자원으로 자리잡기 위해 해결해야 할 과제도 산적해 있다. 더 큰 걸림돌은 환경오염 문제다. 오일샌드에서 원유 1 리터를 추출하려면 물 1.8 리터가 필요하다. 사용된 물에는 2%의 중질유가 포함되어 있으나 이를 완전히 제거하는 방법은 아직 마련되지 않았다. 게다가 캐나다의 지구 온난화 방지 협약을 비준해 2012년까지 이산화탄소 배출을 대폭 줄여야만 한다. 이 역시 이산화탄소 배출량이 많은 오일샌드 공정에 큰 부담이며, 채굴로 인한 대기과 수질 오염이 막대하고, 이 과정에서 자연 친화적 천연가스의 낭비 및 산림 훼손 문제 등이 심각하다.

3. 비투맨 회화[3,4]

비투맨은 극성 및 비극성물질들이 복잡하게 결합되어 있는 상태인데, 극성물질의 상호작용에 의하여 비투맨의 구조 및 물리적인 성질이 결정된다.

캐나다 Athabasca 지역의 채취된 비투맨의 조성을 Table 1에 나타내었다.

모든 아스팔트가 주로 탄소와 수소로 이루어져 있지만, 비투맨에

Table 1. Elemental composition of Athabasca bitumen

Element	Composition
C	83.1%
H	10.1%
O	1.17%
N	0.56%
S	5.14%
Ni	150 ppm
V	290 ppm

는 소량의 헤테로원자(S, N, O)가 포함되어 있는데, 고리화합물 내에 혹은 분자내 작용기 그룹에 포함되어, 방향족 화합물이 극성을 갖도록 하는데 기여한다. 비투멘은 아래와 같이 종류의 유기화합물의 집합체라 볼 수 있다. 즉,

- (1) 지방족 화합물(aliphatics, linear or chain like molecules)
- (2) 고리화합물(cyclics, naphthenic ring type materials)
- (3) 방향족 화합물(ring materials that are unsaturated)

지방족 및 고리화합물은 3차원 구조를 가지고 있어서, 분자들끼리 서로 떨어져 있지만, 방향족 화합물은 평면구조를 가져 여러 분자가 포개져 겹쳐있을 수 있다. 이렇게 다양한 종류의 분자들이, 헤테로원자가 존재하는 상태에서 혼합되어 상호작용을 이루면서 비투멘의 성질을 결정한다. 비투멘을 단순분류(simple fractionation)하면 아스팔텐(asphaltene)과 말텐(maltene 혹은 petrolenes)으로 나뉘어진다.

3-1. 아스팔텐

아스팔텐은 화학적으로 많은 헤테로원자를 가진 극성 작용기를 가진 고도로 농축된 방향족화합물로 이루어져 있다. 이는 비투멘에 선형알칸화합물을 혼합하였을 때 침전으로 분리되는 부분을 말하는데 사용하는 알칸의 종류에 따라 다르다. 아스팔트는 비투멘중에서 가장 극성이 강한 분자 덩어리이며, 용매나 열에 의해 분자들이 뭉쳐질 수 있다. Field ionization mass spectroscopy에 의하면 아스팔트는 큰 분자가 아니라 극성분자들이 강하게 결합되어 있는 형태인 것으로 예상된다. 아스팔트 성분의 극성은 헤테로원자(S, N, O)로 인하여 형성된다. Table 2에서 보듯이 비투멘과 중질유는 비중과 밀도로 그 차이를 비교할 수 있는데, 점도와 밀도는 유사하지만, API gravity는 서로 다르다. 비투멘과 중질유는 기존의 경질유에 비하여 점도가 크며 헤테로원자가 상당량 공존한다(Table 3). 대부분의 중질유의 특

Table 2. UNITAR definitions of heavy oils and bitumens

	Viscosity (mPa-s)	Density (g/cc)	API gravity*
Heavy oil	102-105	0.934-1.0	10-20
Bitumen	> 105	> 1.00	< 10

*API gravity = 141.5/(specific gravity at 15.6°C)-131.5

Table 3. Properties of light and heavy crude oils

	Light crude	Cold Lake	Athabasca	Morichal
API gravity	38	10	9	4.9
S (wt%)	0.5	4.4	4.9	4.1
N (wt%)	0.1	0.4	0.5	0.8
Metal (wppm)	22	220	280	863
Viscosity (m ² /s*106 at 40°C)	5	5,000	7,000	
Vacuum resid 525 °C+ (Liq. Vol%)	11	52	52	80

성분석은 주로 아스팔텐에 대하여 연구하여 왔다. 아스팔텐은 중질유 중에서 가장 분자량이 큰 물질이며, 벤젠에는 용해되지만, n-펜텐에는 불용성이다. Athabasca 비투멘의 15~20%가 아스팔텐으로 이루어져 있고, 여기에는 황(8~9%), 산소(2~3%), 질소(1%)를 함유한다.

3-2. 말텐(maltenes, petrolenes)

말텐은 비투멘의 나머지 성분으로, Oil 및 Resin으로 이루어져 있다. 이 두 성분을 분리하기 위하여 Clay/gel 분리법에 의해 이루어질 수 있다. 노말펜탄등과 같은 저비점 포화탄화수소에 용해되는데, 이것을 알루미늄나프탈 또는 실리카젤에 침투시키면 Resin 부분만 흡착되고 Oil 성분이 통과되어 Resin과 Oil이 분리된다. 실리카젤에 흡착된 Resin은 벤젠, 아세톤 또는 사염화탄소에 의해 용해되고 실리카젤로부터 추출된다.

3-2-1. Oils

이는 비투멘의 액체부분이면 n-, iso-, cyclo-paraffin 및 알킬화 아로마틱기를 갖는 농축된 납센이다. 여기서 방향족 성분은 3개 혹은 4개의 납센고리를 가지며 비극성이다.

3-2-2. Resins

이는 화학적으로 아스팔텐과 매우 유사한데, 오일로부터 아스팔텐으로 전이된것으로, 포화된 방향족, 헤테로원자를 갖는 방향족 고리화합물, 헤테로원자를 갖는 작용기를 갖는 polycyclic 분자로 주로 이루어진다. 레진은 아스팔텐보다 극성이 작아 분자간 상호작용이 약하다.

한편 중질유의 화학적인 성질을 이해하기 위하여 다양한 종류의 분석기술이 사용된다. ¹³C-NMR, ¹H-NMR, GC, XRD, IR, 종류 등이 주로 사용된다(Table 4참조). 그 이외 ruthenium ion-catalyzed oxidation (RICO), pyrolysis를 사용함으로써 비투멘의 구조에 대한 정보를 알아낼 수 있다. 최근의 첨단 분석장비의 도움을 받아도 비투멘을 정확히 분석하는 것은 불가능하나, 납사와 같은 좀 더 작은 분자량의 유분은 분석이 가능하다.

RICO는 아스팔텐의 구조를 분석하는데 매우 중요한 역할을 하는데, RICO가 1950년대에 처음 제시되기는 하였지만[5], acetonitrile이 유용한 용매로 사용됨이 알려지기 전까지는 관심이 없었다[6]. 아세토니트릴은 RICO 반응에서 생성되는 중간생성물이 침전으로 형성되는 것을 막아준다. RICO는 모든 방향족 탄소를 이산화탄소와 polycarboxylic acid로 산화시킨다. 방향족 고리에 붙어 있는 알킬기는 카복실산으로 전환되고, 농축된 방향족 화합물은 폴리카복실산으로 전환된다. 벤젠은 이산화탄소로 산화되고, 방향족고리에 붙어 있는 alkyl chain은 alkanolic acid로 전환된다. 표준물질을 기준으로 하여 RICO 반응에서 얻어진 생성물은 GC로 분석한다. 대부분의 RICO 반응에 사용되는 출발물질, 생성물 및 화학양론에 대

Table 4. How the relative concentrations of various chemical functional groups present in various catalytic hydrocracked heavy oil fractions were calculated [4]

Functional Group	Quantification Method
Benzene	Mass balance on aromatic carbon
Phenanthrene	$^1\text{H-NMR}$
Biphenyl bridge	Balance on aromatic substitution
α -methyl	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
α -methylene	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
β -methyl	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
γ -methyl	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
Chain methylene	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
Chain methyne	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
Naphthenic methyne	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
Naphthenic methyl	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
Naphthenic	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
Methylene	$^{13}\text{C-NMR}$, $^1\text{H-NMR}$
Benzothiophene	$^{13}\text{C-NMR}$
Sulphoxide	IR and potentiometric titration
Thioether	$^{13}\text{C-NMR}$
Indole	$^{13}\text{C-NMR}$
Quinoline	$^{13}\text{C-NMR}$
Amide	IR and potentiometric titration
N-substituted indole	Balance on nitrogen
Benzofuran	Balance on oxygen
Carboxylic acid	IR and potentiometric titration
Ketone	IR and potentiometric titration
Aromatic hydroxyl	IR and potentiometric titration

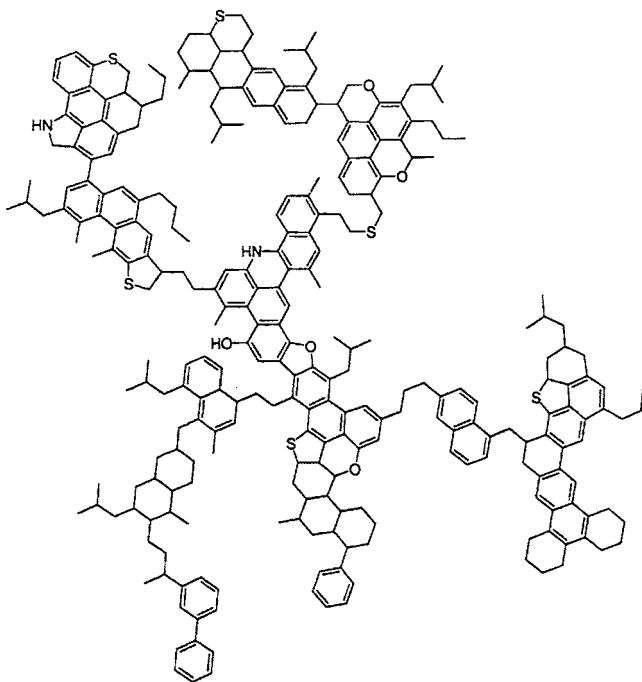


Fig. 6. A heavy oil molecule that is consistent with current analytical information.

하여는 잘 알려져 있다. 그러므로 RICO 반응의 최종생성물의 정량 분석으로부터 중질유의 구조를 비교적 자세하게 예측할 수 있다. 그리고 아스팔텐을 열분해하여 얻어지는 생성물을 GC/MS로 분석하여 중질유의 구조에 대한 정보를 얻을 수 있다[7].

이상과 같은 다양한 종류의 분석방법을 통하여 제시된 아스팔텐 구조를 Fig. 6에 나타내었다[8].

4. 비투맨 upgrading 기술[1]

Upgrading은 비투맨을 합성원유로 전환시키는 전반적인 기술을 말한다. 비투맨은 매우 복잡한 혼합물로서(약 2천 개 이상의 탄화수소의 혼합물), 수소성분이 탄소성분에 비하여 매우 적어서, 탄소를 제거하거나 수소를 첨가함으로써 분자구조가 바뀌기도 한다. Upgrading에서 얻어지는 주 생성물은 정제과정을 거쳐 소비자에게 돌아가는 여러가지 형태의 상품으로 전환될 수 있는 합성원유이다. Upgrading 과정에는 크게 4 단계가 있는데, thermal conversion, catalytic conversion, distillation, hydrotreating 등이 있다. Upgrading의 주 목적은 오일샌드에서 비투맨을 분리하고 이로부터 정제가 가능한 상태로 만드는 것이다. Upgrading의 첫 번째 단계는 증류과정을 통하여 naphtha를 분리하는 것인데, 이 naphtha는 다른 공정에서 다시 사용할 수 있다.

4-1. Thermal conversion(coking)

길이가 긴 탄화수소를 열을 가하여 작은 분자로 쪼개는 과정(cracking 이라고도함)이며, coking은 격렬한 thermal cracking 인데, 이때 비투맨이 가벼운 분자 혹은 정제가 가능한 탄화수소(naphtha, kerosene distillates, gas oil 등)로 upgrading 된다. 이 과정에서 코크가 부산물로 생성되는데, 현재 비투맨을 upgrade하기 위하여 delayed coking, fluid coking 등이 기술이 사용되고 있다.

4-1-1. Delayed coking

비투맨을 500 °C로 가열하고, double-sided coker의 한 쪽으로 펌프로 퍼올린다. 비투맨은 두 가지 생성물로 나누어진다. 즉, 고체상태의 코크와 가스 증기이다. 한쪽을 코크로 채우는데 약 12시간이 소요된다. 한 코크 drum이 꽉차면, 가열된 비투맨은 두번째 코크 drum에 넘겨진다. 첫번째 coking drum으로부터 고체상태의 코크를 잘라내기 위하여 고압의 water drill이 사용된다.

4-1-2. Fluid coking

이는 delayed coking과 유사한 개념의 기술이지만 연속공정이 특징이다. 여기에는 단 한 개의 coking drum만 존재한다. 비투맨을 500 °C로 가열하지만, 비투맨을 펌프로 퍼올리는 대신, coker의 전체에 고운 입자의 형태로 분무된다. 비투맨은 가스 증기와 코크로 나누어진다. 코크는 고운입자 형태로 되어 바닥에서부터 배출된다.

코크의 값어치는 코크 furnace의 연료인데, 이는 hydrocracking 공정에 필요한 열을 낸다.

4-2. Catalytic conversion

이는 오일분자를 더 작은 분자로 그리고 정제가 가능한 탄화수소로 분해하는 기술이다. 이 기술에서 사용되는 촉매의 역할은 매우 중요하며, 두 가지 기능을 갖는다. 즉, 하나는 큰 분자를 작게 분해하는 기능과 특징의 크기와 모양을 갖는 분자만을 선별하여 생성하는 기능 등이다. 때로 접촉분해시 고압의 수소를 가하는 경우도 있는데 이를 hydroprocessing이라 하며, 이때 수소가 풍부한 분자로 전환된다. 촉매에 의한 접촉분해 기술은 열분해 기술보다 더 질이 우수한 생성물을 얻을 수 있다.

4-3. 증류

우리에게 잘 알려진 기술로서 비투맨을 비등점 차이로 인하여 무

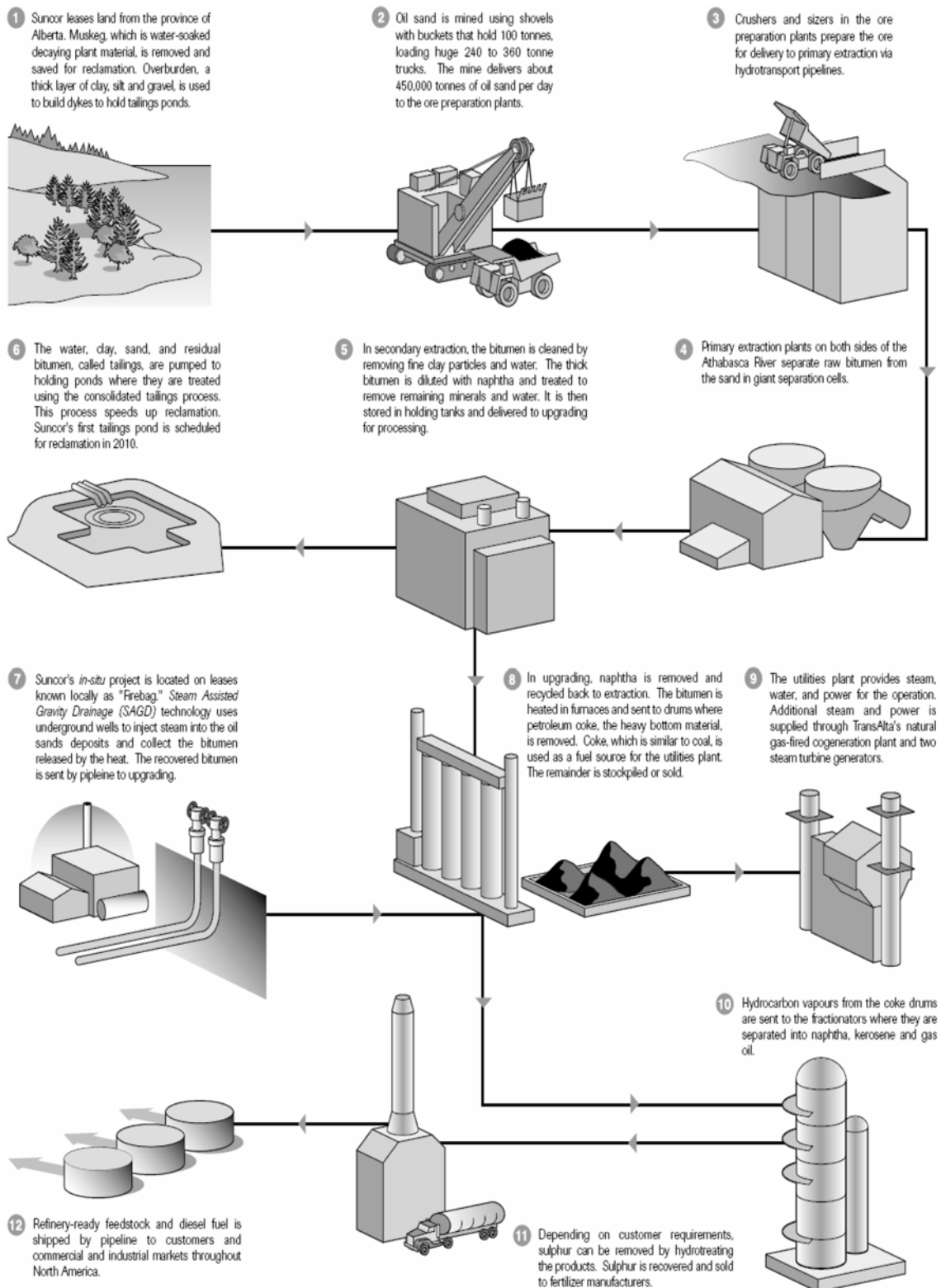


Fig. 7. How bitumen in oil sand is mined and processed.

겉과 비중이 큰 탄화수소(비등점이 높은)는 액체상태로 모이고, 기체 증기는 응축되어 gas oil, kerosene, naphtha가 형성된다.

4-4. Hydrotreating

이 공정은 비투맨으로부터 gas oil, kerosene, naphtha 등을 만드

는데 필요한 기술로서, 비투맨을 고압, 300~400 °C에서 수소와 혼합하여 반응시키면 여러 종류의 액상 탄화수소가 생성된다. 이 과정에서 질소, 황 및 미량의 금속 등의 불순물이 감소되는데, 이는 환경적인 측면과 정제장치에서 문제를 유발시킬 수 있는 원인을 제거한다는 관점에서 매우 중요하다. 비투맨으로부터 제조한 합성원유

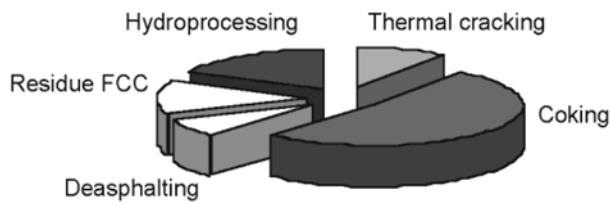


Fig. 8. Processes for primary upgrading.

는 sweet하기 때문에 정제하기가 용이하다(여기에서 sweet란 황과 같은 부식성물질 함량이 매우 적음을 뜻함).

Fig. 7은 Suncor사에서 제시한 자료로서 오일샌드를 출발물질로 하여 합성원유를 제조하는 전과정을 소개한 그림이다. 그리고 Fig. 8 에는 대표적인 upgrading 기술의 종류 및 상대적인 비중을 표시하였는데, coking, hydroprocessing, thermal cracking 기술이 80% 이상을 차지한다.

5. 오일샌드의 경제성 [9,10]

오일샌드에서 비투멘을 뽑아내려면 원유 1 배럴당 약 20 달러의 비용이 필요해 그동안 방치되어 왔다. 국제 유가가 1980년대 중반 이후 지난 2002년까지 배럴당 10 달러 후반에서 20 달러 초반을 오르내렸기 때문에 오일샌드의 경제성이 부족하다고 판단하였다. 오일샌드는 생산방식에 따라 차이가 있지만 일반적인 유전개발 보다 오일샌드 개발 비용이 2배 정도 이다. 하지만, 2005년부터 고유가 시대가 본격적인 막이 올라 현재 70 달러를 육박하고 있자, 오일샌드에 관심이 높아지고 있다. 중국은 이미 2006년 4월 중국해양석유총공사(CNOOC)를 앞세워 캐나다 앨버타 지역에서 오일샌드 추출 사업을 진행중인 MEG사의 주식 중 17% 가량을 인수하며 오일샌드 개발에 진입하였다. 이어 중국의 시노펙이 6월 캐나다앨버타의 Northern Lights의 오일샌드 채굴권을 1억 500만 캐나다달러(약 871 억원)에 사들였다. 외신에 따르면, 시노펙은 향후 5년간 45억 캐나다달러(약 3조 9150억 원)를 투자해 10만 톤/일의 오일샌드를 채굴할 계획이다.

앞으로 10년 후에는 비투멘의 생산량이 현재의 1백만 bpd에서 3 백만 bpd 수준으로 증가할 것으로 예상된다(Fig. 9참조). 북미의 crude oil 수요가 현재와 유사한 수준을 유지한다면 오일샌드 생산자들은 그들의 생성물을 팔 수 있는 시장을 찾게될것이다. 문제는 앨버타 refinery capacity가 94%(약 560,000 bpd) 가동 되고 있다는 것이다. 따라서 상당부분의 비투멘과 비투멘 생성물은 정제하기 위하여 다른 시장으로 팔려 나가게 될 것이다. 그래서 문제는 첫째 시장을 찾는것이고, 둘째는 접근 가능한 시장이 있더라도 upgraded SCO 만을 취급할 수도 있다는 점이다. 오일샌드 사업가는 지금까

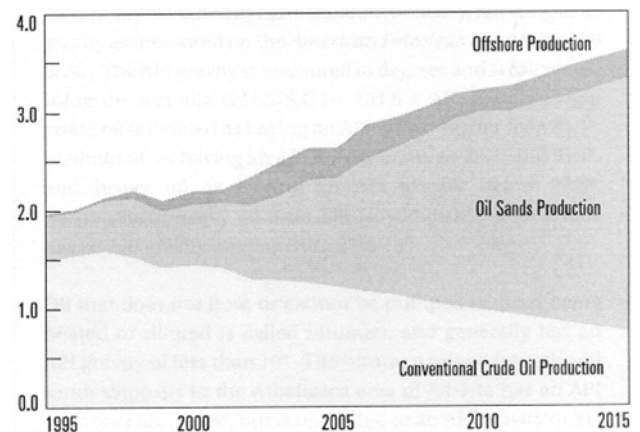


Fig. 9. Annual Canadian oil production (1995-2015) (Conventional, Oil sands, and Offshore in Millions of bbls).

지 partially upgraded bitumen을 찾는 고객을 찾는데 전혀 문제가 없었다. 이때 오일샌드 사업가가 가진 전략은 다음의 4가지가 가능하다. 즉, (1) refinery를 구매하는 방법, (2) 특정 buyer/facility를 위한 tailoring output, (3) refiner가 비투멘을 업그레이드 할 시설을 확보할 수 있도록 장기 계약을 체결하는일, (4) 질이 우수한 SCO를 만드는일 등, 최근에는 공급자들은 heavy, medium, light crude oil refiner에 필요한 다양한 종류의 비투멘 브랜드를 만든다. 예를 들면, “Dilbit”는 비투멘과 희석제의 슬러리이고, 이는 수송관을 통하여 쉽게 공급할 수 있다.

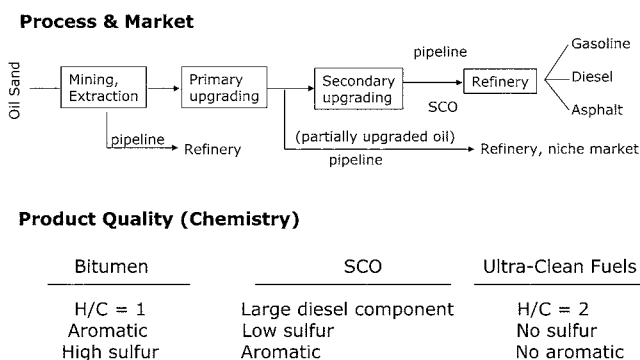
한편, 오일샌드 개발에 필요한 시설투자 자금은 대단하다. 대개 오일샌드 프로젝트는 수십억 달러 수준이다. 초창기에 SCO 공급가격은 C\$ 35/barrel(1980년대 달러)이었지만, 그 이후 생산가격이 급격히 하락하여, 공급가격이 C\$ 22~C\$ 28 수준이다. In situ 공급가격은 mining(채굴) 공급가격 보다 비싸다. CSS 추출법에 의한 공급가격은 C\$ 13~19, CHOPS에 의한 공급가격은 C\$ 12~C\$ 16, SAGD에 의한 공급가격은 C\$ 11~C\$ 17 수준이다(Table 5참조). 향후 세계 에너지 사용이 현재와 유사한 수준으로 증가한다면, 오일샌드 프로젝트는 도전해 볼만한 사업이다. Fig. 10에는 오일샌드를 업그레이드하여 최종 석유화학제품에 되기까지의 전과정 및 각 단계에서의 제품의 질에 대하여 간략하게 소개하였다.

국내에서도 SK(주)가 미국의 힌트오일사와 함께 오일샌드 개발에 참여하고 있으며, 한국석유공사는 최근 미국 석유회사 뉴몬트로부터 2억5000만 배럴 규모의 오일샌드 광구를 2억7000만 달러에 인수했다. 2008년 생산시설을 세워 2010년부터 하루 3만 5000 배럴의 원유를 생산할 계획인데, 이는 현재 한국이 해외에서 유전 등을 확보해 생산하는 원유(하루 8만 5000 배럴)의 40% 수준이다[11].

Table 5. Estimated operating and supply cost (by crude type at the plant gate in 2003 SCDN/bbl)

Operation	Crude type	Operating cost	Supply cost	Recovery factor (%)
Cold production, wabasca, seal	Bitumen	4~7	10~14	5~15
Cold heavy oil production with sand (CHOPS), cold lake	Bitumen	6~9	12~16	5~15
Cyclic steam stimulation (CSS)	Bitumen	8~14	13~19	20~25
Steam assisted gravity drainage (SAGD)	Bitumen	8~14	11~17	4~50
Mining and/or extraction	Bitumen	6~10	12~16	
Integrated mining and upgrading	Synthetic	12~18	22~28	

Source: national energy board (NEB)



참고문헌

1. "The Oil Sands Story": www.oilsandsdiscovery.com/oil_sands_story/facts.html.
2. "Aboriginal Innovations in Arts, Science and Technology Handbook", Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Canada(2002).
3. Holleran, G., "Compositionally Controlled Bitumen for Quality", VSS Technology Paper Library (www.slurry.com/techpapers_techpapers_contribit.shtml).
4. Sheremata, Jeff M., "Molecular Modeling of Heavy Oil", Master degree thesis, University of Alberta, Spring(2001).
5. Djerassi, C. J. and Engle, R. R., "Oxidation with Ruthenium Tetroxide", *J. Am. Chem. Soc.*, **75**, 3838-3841(1953).
6. Carlson, P. H. J., Katsuki, T., Martin, V. S. and Sharpless, K. B., "A Great Improved Procedure for Ruthenium Tetroxide Catalyzed Oxidations of Organic Compounds", *J. Org. Chem.* **46**, 3936-3938(1981).
7. Payzant, J. D., Lown, E. M. and Strausz, O. P., "Structural Units of Athabasca Asphaltene : the Aromatics with a Linear Carbon Framework", *Energy & Fuels*, **5**, 445-453(1991).
8. Strausz, O. P., Mojelsky, T. and Lown, E., "The Molecular Structure of Asphaltene: An Unfolding Story", *Fuels*, **71**, 1355-1363(1992); Strausz, O. P., Mojelsky, T. W., Faraji, F. and Lown, E. M., "Additional Structural Details on Athabasca Asphaltene and Their Ramifications", *Energy & Fuels*, **13**, 207-227(1999).
9. Engelhardt, R., "An Introduction to Development in Alberta's Oil Sands", School of Business at University of Alberta, Feb. 10, (2005).
10. Hirsch, T., "Treasure in the Sand : An overview of Alberta's Oil Sands Resources", Canada West., April(2005).
11. Yonhap News, July 24(2006).

Fig. 10. Process and product quality in the upgrading bitumen to synthetic crude oil followed by refining to clean fuels.

6. 결 론

오일샌드를 값어치 있게 하기 위하여 (1) 채굴하고(Mining), (2) 이로부터 비투멘을 뽑아낸 후(Extraction), (3) upgrading 기술을 통하여 합성원유 및 그에 상응하는 다양한 석유화학 제품들을 만들어야 하는데, 이때 얻어지는 합성원유는 우리가 알고 있는 일반원유와 크게 다르지 않다.

오일샌드를 자원화하기 위하여 해결해야 할 문제는 산적해 있는데, (1) 채굴 및 추출을 위한 막대한 투자비를 줄이는 일, (2) 추출된 비투멘의 점도를 낮추는 문제, (3) 막대한 양의 천연가스 사용으로 인한 이산화탄소 배출, (4) 중질유가 잔존하는 폐수 처리 문제, (5) 채굴 후 손상된 자연 산림의 복원 문제, (6) 개선된 비투멘의 upgrading 기술 개발 등이 그것이다.

전세계적으로 석유화학 회사들이 확보하고 있는 중질유의 upgrading 기술을 사용하여 오일샌드를 고부가화하는 사업들이 부분적으로 이루어지고 있으나, 천연 오일샌드를 자원화하기 위하여는 우리나라에서도 국가적인 차원에서 원천기술 개발이 절실하다.