

아임계 및 초임계수를 이용한 Athabasca 오일샌드의 추출

박정훈[†] · 손수환 · 백일현 · 남성찬

한국에너지기술연구원 온실가스연구단
305-343 대전 유성구 장동 71-2
(2009년 2월 16일 접수, 2009년 3월 24일 채택)

Extraction of Athabasca Oil Sand with Sub- and Supercritical Water

Jung Hoon Park[†], Sou Hwan Son, Sung Chan Nam and Il Hyun Baek

Korea Institute of Energy Research, Green House Gas Research Center, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 16 February 2009; accepted 24 March 2009)

요 약

아임계 및 초임계 조건의 물을 이용하여 캐나다산 Athabasca 오일샌드로부터 역청 추출 및 황 제거 실험을 수행하였다. 0~120 min의 반응시간, 360, 380 °C의 온도, 15~30 MPa의 압력 및 0.074~0.61 g/cm³의 물 밀도를 변화시키면서 micro reactor에서 역청 수율을 조사하였다. 역청 수율은 온도에 상관없이 압력이 증가할수록 증가하였으며, 특히 초임계 영역에서 수증기 개질반응에 의해 생성된 수소에 의해 역청의 수율이 급격히 증가하였다. 전체 기상 생성량은 압력 증가에 따라 감소하였으나 380 °C에서 황과 수소의 생성분율은 25 및 30 MPa로 압력 증가에 따라 소량 증가하였다. 이상의 결과는 초임계 조건이 수소의 생성과 황의 제거에 유리하다는 것을 보여준다. 초임계 조건(380 °C, 25와 30 MPa)에서 역청 수율은 최대 약 22%였으며, 오일샌드에 함유된 황 제거율도 최대값 40%에 도달하였다.

Abstract – Bitumen extraction and sulfur removal from Athabasca oil sand were conducted using water in sub- and supercritical condition. Bitumen yield in micro reactor was investigated in the pressure range of 15~30 MPa, the temperature of 360 and 380 °C and water density 0.074~0.61 g/cm³ for 0~120 min. Bitumen yield increased with reaction pressure irrespective of temperature and dramatically increased in especially supercritical region due to hydrogen formed from water gas shift reaction. Total amount of gas product decreased with reaction pressure but the portion of sulfur and hydrogen increased a little with increasing pressure to 25 and 30 MPa. It is seen that supercritical condition was favourable to the hydrogen formation and sulfur removal. Bitumen yield and sulfur removal from original oil sand reached a maximum 22% and 40% respectively in supercritical condition(the reaction time of 60 min at 380 °C and 25 or 30 MPa).

Key words: Supercritical Water, Oil-Sand, Sulfur Removal, Upgrading, Extract

1. 서 론

재래적 방법에 의한 석유자원 공급이 한계를 보이고, 중국 및 인도 등 신흥 공업국의 수요증가로 인해 석유자원 고갈이 가시화됨에 따라 지속적인 원유 공급을 위해 오일세일, 오일샌드 등과 같은 비재래형 석유계 원료(Unconventional Oil) 개발이 증가되고 있다. 배럴당 30달러의 저유가 시대에는 유정에서 원유 1배럴을 뽑아올리는 데 드는 비용(15달러)에 비해 오일샌드(25달러)나 오일세일(33달러)로부터의 원유 생산 비용이 높아 경제성이 없었으나 최근의 고유가는 오일샌드 및 세일에 대한 연구 및 투자를 활성화시키고 있는 실정이다. 국제 원유 매장량은 1조 2,400억 barrel에 해당하며 현재 소비 수준을 고려하면 43년의 가채년도를 가지는 반면, 오일세일의 경

우 330조 barrel에 해당하는 매장량을 가지고 있다. 오일샌드까지 원유 매장량에 포함시킨다면 세계 최대 원유 매장량 보유국은 사우디아라비아를 제치고 베네수엘라가 차지하며, 알버타주를 중심으로 상당량의 오일샌드를 가지고 있는 캐나다도 오일샌드를 제외한 순위에서는 22위에 불과하지만 오일샌드를 포함할 경우 이란 이라크 쿠웨이트보다 앞선 세계 3위 석유 대국이다. 캐나다는 세계 제 2의 오일샌드 보존국가로서 알버타주에 부존해 있는 오일샌드의 원시매장은 2.5×10^{12} bbl에 이르고 이중에서 경제적으로 생산이 가능한 가채 매장량은 약 180×10^9 bbl로 알려져 있다[1]. 캐나다 알버타주의 대표적인 오일샌드 부존지역은 Athabasca, Cold Lake, Peace River 등이 있다[2].

초임계 유체는 여러 분리공정에 이용되고 있으며, 초임계 유체를 이용할 경우 유체의 밀도, 점도, 확산계수는 액체와 기체의 중간값을 갖고 있어 높은 밀도와 확산계수에 따른 용해도 및 물질전달속

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

도 향상 효과를 얻을 수 있고 액체보다 점도가 낮기 때문에 액체에 비해서 미세기공을 갖고 있는 고체조각으로 침투하는데 매우 월등하다. Berkowitz 등은 알버타주의 오일샌드를 400 °C, 14~24.5 MPa의 조건에서 초임계수로 처리하여 80%의 역청(bitumen) 추출 수율을 얻었다고 보고하였고[3], 이후 오일세일에 대한 초임계 추출 연구를 통해 70% 수율을 얻을 수 있으며, 오일세일 내부의 황을 대부분 제거할 수 있다고 발표하였다[4]. Subramanian 등[5]은 미국 유타주의 오일샌드로부터 초임계 프로판을 이용하여 역청을 추출하는 연구를 수행하여 45%의 최대 수율을 얻었다고 보고하였다.

오일샌드는 역청과 모래, 수분 및 진흙 같은 기타 미네랄로 구성되어[6] 초임계 유체를 이용하여 이중에 역청만을 분리한 후 역청을 물리, 화학적 처리하여 경질화합물로써 휘발유, 등유, 경유 및 윤활기유 같은 저분자 탄화수소로 전환시킬 수 있다. 본 연구에서는 아임계와 초임계 조건에서 물을 이용하여 캐나다 Athabasca산 오일샌드로부터 역청을 추출하는 실험을 수행하였다. 또한 온도, 압력, 반응시간에 따른 역청의 추출 수율 및 황 제거 특성을 살펴보았다.

2. 실험

2-1. 실험시료

오일샌드는 매장위치에 따라 다소 성분이 다를 수 있으나, 75~85%의 무기질(모래, 점토, 미네랄 등), 3~5%의 물과 1~18%의 역청으로 이루어져 있다. 보통 6% 이하 역청을 함유한 오일샌드는 채굴하여도 경제성이 부족하고, 12% 이상의 역청을 함유한 오일샌드가 경제성이 있다고 알려져 있다[7]. 본 실험에서는 캐나다산 Athabasca 오일샌드를 사용하였고, 톨루엔에 용해된 양을 기준으로 역청의 양을 환산하였다[3]. 역청의 양은 약 14% 수준으로 경제성 있는 오일샌드를 대상으로 추출을 수행하였으며, 오일샌드 내의 역청과 황 함량을 Table 1에 정리하였다.

2-2. 실험장치

본 실험에 사용된 micro reactor는 Fig. 1에서와 같이 구성되어 있다. Micro reactor의 부피는 42.3 ml이고, 추출 후 가스 생성물의 수집을 위하여 상단에 on-off 밸브를 장착하였다. 해당온도와 압력조건에 의해 계산된 탈염수의 양 2~30 g과 오일샌드 8 g을 micro reactor에 넣고 내부는 헬륨으로 채운 후 밀봉하였다. 계획된 온도로 유지되는 용융염 가열기(molten salt bath) 내에 밀봉된 micro reactor가 잠기도록 넣은 후 교반을 위하여 앞 뒤로 흔들어 주었다. 반응기 투입직후 용융염의 온도는 약 20 °C 정도 감소하였다가 2~10 min 후 설정 온도와 압력에 도달하였다. Molten salt bath 내에서의 유지 시간 이후 micro reactor를 상온의 물이 담긴 수조에 담금으로써 급냉하여 반응을 종결하였다. Molten salt의 온도와 교반속도는 K-type 열전대와 속도조절 게이지가 달린 각각의 PID 제어기에 의해 조작되었다. 오일샌드로부터 역청의 추출은 0~0.67 g/cm³ 밀도의 물에 의해 360~380 °C의 온도, 15~30 MPa의 압력 조건에서 60 min 동안 각각 수행되었고 아래의 분석방법에 의해 분석하였다.

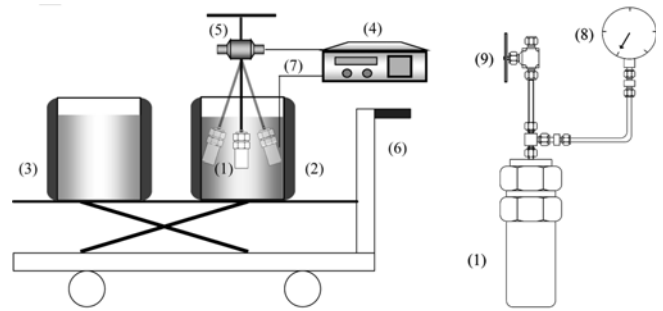


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

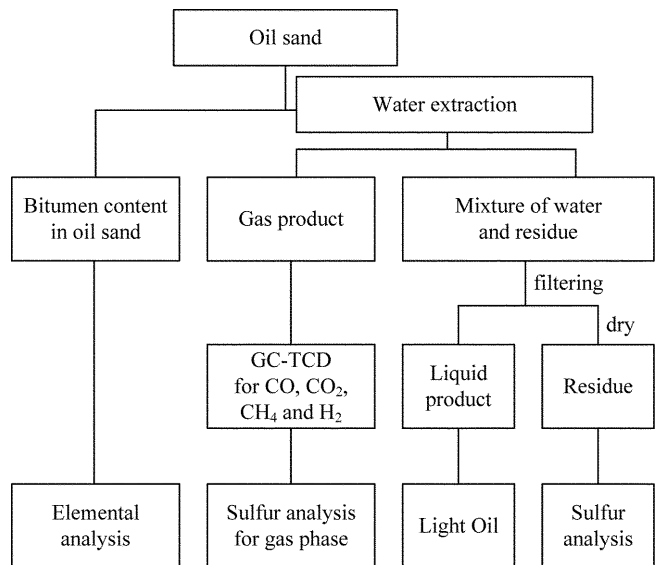


Fig. 2. The procedure of product analysis.

2-3. 분석방법

Fig. 2에 오일샌드의 초임계 추출 및 분석 과정을 요약하였다. 오일샌드 내의 역청 함량은 오일샌드가 톨루엔에 용해되는 양으로부터 다음의 식으로 계산하였다.

$$\text{Bitumen contents (wt\%)} = 100 - \left(\frac{\text{wt. of toluene soluble}}{\text{wt. of oil sand}} \right) \times 100 \quad (1)$$

추출이 종료된 후, 액상 생성물과 잔류 오일샌드는 1.2 μm glass filter를 이용하여 여과하였다. 여과지에 걸리진 것과 여과 후 micro reactor 내부에 남아있는 물질을 각각 80 °C에서 12 h 건조하여 수분을 제거한 다음 두 개의 무게를 합쳐서 잔류물질(residue)로 정의하였으며, 오일샌드 원시료와 잔류물질의 무게를 기준으로 식 (2)와 같이 전체 전화율을 계산하였다. 반면에 역청의 추출 수율은 오일샌드 원시료 안에 존재하는 역청으로부터 추출되는 액상 생성물 무게의 비로 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\text{Total conversion(wt\%)} = 100 - \left(\frac{\text{wt. of residue}}{\text{wt. of oil sand}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Table 1. Bitumen and sulfur contents in oil sand

Oil-sand (g)	Toluene soluble (g)	Toluene insoluble (g)	Bitumen contents (%)	Average (%)	Sulfur content (%)
1.927	0.259	1.668	13.44		
2.425	0.385	2.040	15.88	14.54	0.6
2.746	0.393	2.353	14.31		

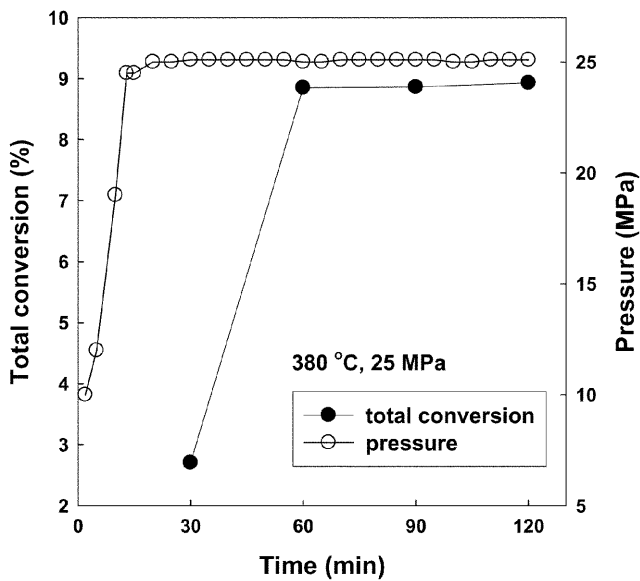


Fig. 3. Total conversion of oil sand extraction and pressure change of micro reactor according to reaction time.

$$\text{Bitumen Yield (wt\%)} = \left(\frac{\text{wt. of liquid product}}{\text{wt. of bitumen contents in oil sand}} \right) \times 100 \quad (3)$$

CO, CO₂, CH₄, H₂ 가스 생성물의 양은 carbosphere(80/100) 컬럼이 장착된 가스 크로마토그래피(6890N, Agilent)로, 그리고 기상으로 분리된 황은 sulfur analyzer(9000NS, ANTEK)로 각각 정량 분석하였다. 원시료로부터 가스상으로 분리 생성된 물질의 수율과 원시료에 존재하는 황의 기상으로 제거율은 아래의 식으로 각각 표현될 수 있다.

$$\text{Gas Yield (wt\%)} = \left(\frac{\text{wt. of gas product}}{\text{wt. of bitumen contents in oil sand}} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Sulfur gas removal (wt\%)} = \left(\frac{\text{wt. of sulfur in gas product}}{\text{wt. of in oil sand}} \right) \times 100 \quad (5)$$

원시료와 잔류물에 존재하는 황의 양은 sulfur analyzer(SC-432DR, LECO Co.)에 의해 측정되었고, 두 값으로부터 식 (6)과 같이 전체 황 제거율을 계산하였다.

$$\text{Total sulfur removal (wt\%)} = 100 - \left(\frac{\text{wt. of sulfur in residue}}{\text{wt. of sulfur in oil sand}} \right) \times 100 \quad (6)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 반응시간의 영향

추출실험 시 설정온도에서 반응기의 유지 시간을 결정하기 위해 반응기를 salt bath 내에 30~120 min 동안 각각 유지할 때 압력과 전체 전화율의 변화를 측정하였다. Fig. 3은 380 °C의 salt bath에 반응기를 주입할 때 시간에 따른 반응기의 내부압력과 전화율의 변화를 나타낸 것이다. 반응기가 salt bath에 들어가고 약 10 min 정도 후 반응기의 내부압력은 25 MPa로 계속 유지되었고, 전체 전화율은 유지 시간 60 min까지는 증가하고 그 이후부터는 큰 변화없이 일정하게 됨을 알 수 있다. 초기 10 min까지는 반응기 내부의 물이

기화되어 압력이 급격히 증가하는 시간으로 이때의 전화율은 극히 낮았다. 10 min 이후 25 MPa로 압력이 유지되어도 30 min까지는 초임계수에 의한 가수분해가 충분히 진행되지 않아 전화율은 약 2.7% 수준으로 낮았으며 30 min 이후부터 초임계 추출이 급격히 진행되어 전화율이 증가하였다. 이와 같은 결과는 석탄의 초임계 추출 시 시간에 따른 전화율 실험 결과와도 잘 일치하는 것으로 추출 시 전화율은 60 min 이후에 거의 일정한 수준에 도달하는 것을 알 수 있다[8]. 이후 온도, 압력 변화 실험은 모두 반응시간을 60 min으로 고정하여 수행하였다.

3-2. 온도와 압력의 영향

Fig. 4는 360 °C와 380 °C에서 압력변화에 따른 오일샌드로부터 회수한 역청의 수율 결과를 보여준다. 여기서 역청 수율은 오일샌드 내에 있는 역청 중에 액상 생성물로 추출되는 역청의 양을 나타낸다. 360 °C와 380 °C 모두 압력이 증가함에 따라 역청 수율도 증가하였다. 360 °C, 15 MPa에서는 역청을 추출하지 못하지만 아임계로 들어가는 20 MPa에서는 15.3%로 크게 증가하였고, 이후 압력 증가에서는 18.8, 19.4%로 비교적 작은 증가만이 확인되었다. 반면에 380 °C의 경우 15, 20 MPa에서는 각각 11.3, 13.0%의 수율을 나타내다가 25, 30 MPa에서는 수율이 약 21.5%로 비교적 크게 증가하였다. 380 °C의 경우 초임계 영역으로 들어가는 시점인 20 MPa에서 25 MPa로 압력이 증가할 때 수율이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 반면에 360 °C의 경우는 주로 물의 밀도에 의존하여 증가하는 것으로 판단된다. 즉 15 MPa의 경우는 밀도가 0.0885 g/cm³인 반면 20~30 MPa의 경우 0.5480부터 0.6147 g/cm³의 값을 가지며, 밀도 증가에 따라 용매능(solvent power)이 증가하기 때문에 20 MPa 이상부터 역청 수율이 급격히 증가한 것이다. 그러나 360 °C, 20 MPa 이상의 압력에서는 압력증가에 따라 밀도 값이 아주 소량만 증가하기 때문에 수율 또한 매우 작은 증가만을 보인다. 380 °C, 15 MPa (ρ=0.0739 g/cm³)의 역청 수율이 360 °C, 15 MPa (ρ=0.0885 g/cm³)의 수율보다 높은 이유는 비슷하게 낮은 밀도를 갖는 조건에서는 온도의 영향이 더 지배적이기 때문이다. 반면에 20 MPa에서는

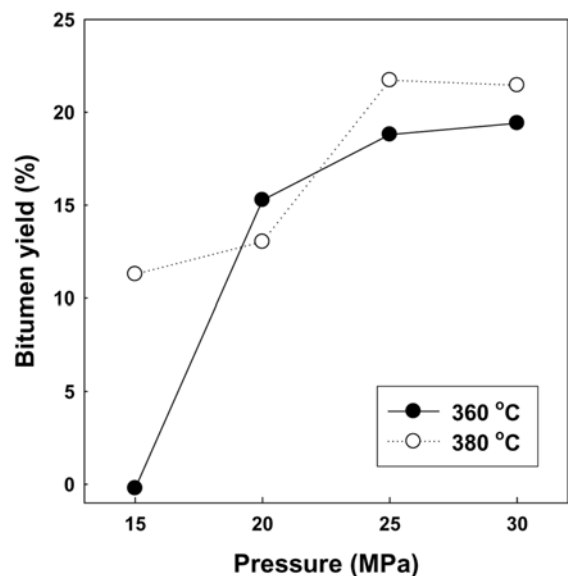


Fig. 4. Bitumen yield according to reaction temperature and pressure.

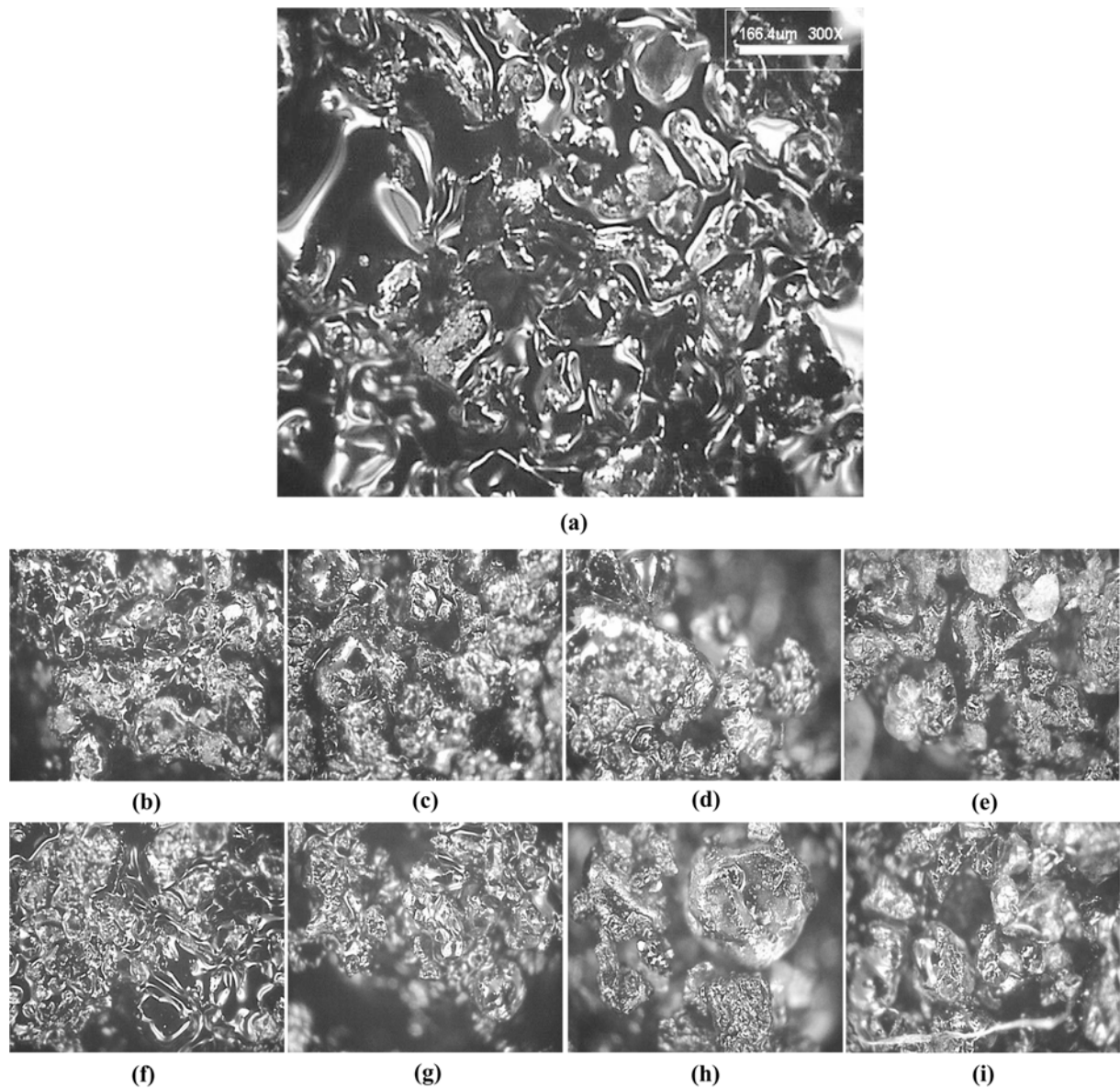


Fig. 5. Close-up view of oil sand samples: (a) original oil sand, (b) 360 °C, 15 MPa, (c) 360 °C, 20 MPa, (d) 360 °C, 25 MPa, (e) 360 °C, 30 MPa, (f) 380 °C, 15 MPa (g), 380 °C, 20 MPa (h), 380 °C, 25 MPa (i) and 380 °C, 30 MPa.

360 °C($\rho=0.5480 \text{ g/cm}^3$)의 수율이 380 °C($\rho=0.1211 \text{ g/cm}^3$)보다 높게 나타났는데, 이것은 360 °C에서의 밀도가 380 °C보다 4배 이상 높아 낮은 온도임에도 용매능이 더 증가했기 때문이다. 따라서 360 °C 추출 조건에서 수율 증가의 중요한 인자는 용매능을 높일 수 있는 밀도 증가에 있으며 따라서 밀도를 증가시킬 수 있는 압력의 영향이 온도보다 더 지배적인 것을 알 수 있다. 반면에 밀도가 0.1 g/cm^3 보다 낮은 영역에서는 온도의 영향이 더 중요하다는 것을 알 수 있다. 25 MPa에서는 380 °C($\rho=0.4508 \text{ g/cm}^3$)의 밀도가 360 °C($\rho=0.5893 \text{ g/cm}^3$)보다 낮지만 수율이 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 초임계 영역에서 물이 역칭의 O-CH_3 , -O-R 과 같은 낮은 에너지의 결합을 공격하여 가수분해 반응을 일으킨 것에 기인한다. 아울러 가수분해 과정에서 발생한 CO와 수증기가 수증기 개질반응을 통해 수소를 생성하고 동시에 수첨반응이 진행되어 중질 역칭을 경질유로 분해, 추출시키기 때문에 역칭의 수율이 높아진다고 생각된다.

Fig. 5는 300 배율의 광학현미경으로 추출 전 오일샌드 시료와 온도 압력변화에 따라 추출한 후의 잔류 시료 사진을 보여준다. 사진에서 검정색으로 표시된 부분이 역칭 부분이며 금색으로 표시된 부분은 역칭이 제거된 후 드러난 무기질(모래, 점토, 미네랄 등)일 것으로 사료된다. 온도와 압력이 증가함에 따라 시료 내의 유분으로 보이는 물질의 양이 줄어든 것이 알 수 있다. Fig. 4의 온도, 압력에 따른 역칭의 수율 결과와 정확히 일치하지는 않지만 전반적으로 온도, 압력 증가에 따라 역칭이 분해, 추출되고 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 2와 3 그리고 Fig. 6은 온도와 압력에 따라 생성된 가스의 부피 비율과 생성량을 각각 보여준다. Table 2에서 360 °C의 경우 압력이 증가할수록 전체 가스 생성량은 줄어들지만 생성되는 수소의 분율은 거의 일정하게 약 9.5~9.7%를 유지한다는 것을 알 수 있다. 또한 C1(CO, CO₂ 및 CH₄)의 분율과 C2 이상의 가스 분율은 C1 가스가 증가하면 나머지 C2 이상 가스들의 분율은 줄어들었다.

Table 2. Effect of pressure on composition of gas products at 360 °C

Pressure (MPa)	Component				
	H ₂ (%)	C1 (%)	H ₂ S (%)	Others (%)	Total gas (ml)
15	-	31.78	1.7	66.52	28
20	9.7	50.66	1.65	37.99	17
25	9.49	42.75	1.14	46.62	16
30	9.59	42.04	1.21	47.16	13

Table 3. Effect of pressure on composition of gas products at 380 °C

Pressure (MPa)	Component				
	H ₂ (%)	C1 (%)	H ₂ S (%)	Others (%)	Total gas (ml)
15	9.68	56.90	1.05	32.37	25.9
20	9.57	44.70	1.16	44.56	21.4
25	11.47	53.59	2.25	32.69	17.31
30	10.69	59.05	1.71	28.56	16.61

Table 3에서도 마찬가지로 압력이 증가할수록 전체 가스 생성량은 줄어들지만 특이한 점은 초임계 영역에서는 수소의 양이 증가했다는 것을 알 수 있다. 이는 초임계 영역에서 아래 식 (7)과 같은 수증기 개질반응이 증가하여 경질유 형태의 액상 생산물을 증가시킨다는 역청 수율의 결과와 잘 일치한다.



이상의 가스 생성물에 대한 결과는 동일한 반응기로 석탄을 물로 추출한 이전의 연구결과[9]와 비교했을 때 온도가 증가할수록 가스 생성량이 증가한다는 점에서는 유사하나 압력 증가에 따라 가스 생성량이 감소한다는 점에서는 상반된 결과를 보인다. 압력 증가에 따른 가스 생성량 감소에 대한 정확한 원인은 아직 알 수 없지만 생성 수소가 오일샌드로부터 경질유를 추출하는데 사용됨으로써 가스 생성량이 일부 줄어들었을 것으로 추측된다.

Fig. 6에서 CO 가스의 경우, 온도에 상관없이 아주 적은 양만이

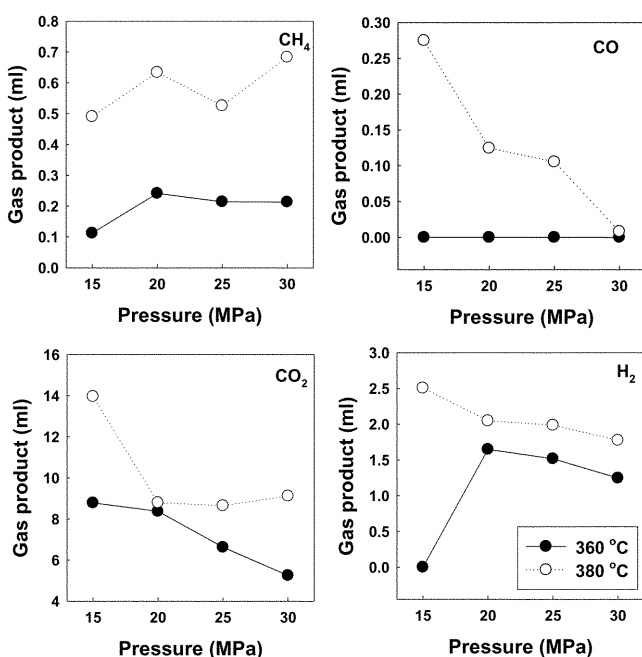


Fig. 6. Gas products according to reaction temperature and pressure.

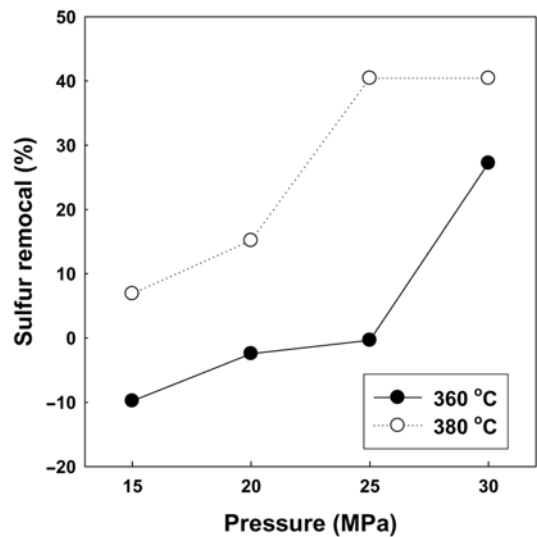


Fig. 7. Total sulfur removal according to reaction temperature and pressure.

생성되었으며, 380 °C의 경우 초임계 영역으로 갈수록 CO가 줄어들어 생성되지 않는 것을 알 수 있다. 이는 수증기 개질반응으로 이미 모든 CO가 소비된 것을 의미한다. 수증기 개질반응으로 생성된 수소와 이산화탄소는 식 (7)에 의해 동일 몰비로 존재해야 하나 수소의 생성량은 CO₂보다 상대적으로 매우 적은 양이 생성된 것을 알 수 있다. 고온 반응에 따른 열분해 혹은 가수분해에 의해 CO₂가 직접 생성되는 것을 고려한다고 해도 수소의 양이 상대적으로 5배 정도 적기 때문에 수소가 액상 생성물 추출에 직접적으로 참여했을 것으로 기대된다. 또한 Fig. 6으로부터 CO, CO₂, CH₄, H₂ 가스는 380 °C에서 발생량이 360 °C의 발생량보다 모두 높게 나타났다. 따라서 오일샌드의 추출에 있어 C1 가스와 수소 발생량에 대한 압력에 따른 상관관계는 찾기 힘들지만, 온도에 대해서는 온도 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다.

3-3. 황 제거

Fig. 7은 온도와 압력변화에 따른 전체 황 제거율을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 360 °C의 경우 그래프가 음의 값을 갖는 것은 반응 후 추출된 역청이 균일하게 분포하지 않아서 미량시료 분석에 있어 오차가 생겼기 때문이다. Table 1에서 알 수 있듯이 원 시료에서 황의 함량은 0.6%로 매우 낮은 수준이고, 초임계 추출 후 잔류물질에서 황의 함량을 분석할 때 Fig. 5에서 보여지듯이 유분 혹은 무기질 부분이 고르게 섞이지 않은 상태로 분석되기 때문에 많은 오차가 생기게 된다. 그러나 이런 오차에도 불구하고 반응 후 얻어진 시료 간의 경향의 차이는 여러 번의 실험을 통하여 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 황 제거율은 380 °C가 360 °C보다 높았으며 온도와 압력이 증가함에 따라 증가하였다. 황 제거율은 초임계 영역에서 높은 값을 보였으며, 380 °C의 25 MPa과 30 MPa에서 약 40.4%의 황 제거율을 나타내었다. Table 2와 3에서 기상으로 제거되는 황의 양과 전체 황 제거율을 비교해 보면 오일샌드로부터 기상으로 제거되는 황은 1.5% 미만이라는 것을 알 수 있으며, 대부분의 황은 물을 통해 이온의 형태로 제거된다고 생각된다. 이와 같은 결과는 석탄의 초임계수 처리를 통한 황 제거 특성실험에 대한 이전 결과와 잘 일치한다[8].

4. 결 론

캐나다산 Athabasca 오일샌드 처리에 있어 반응 온도, 압력 및 물의 밀도 같은 조업 변수와 역청의 회수에 있어 초임계수의 역할을 회분식 micro reactor를 이용하여 조사하였다. 15 MPa의 낮은 압력 또는 낮은 물 밀도에서는 온도의 영향이 지배적이었으며 온도가 증가할수록 역청의 수율이 증가하였다. 그러나 물의 밀도 1 g/cm^3 이상의 아임계 조건에서는 온도보다는 물의 밀도(반응 압력)가 증가할수록 용매능이 증가하여 역청 수율이 증가하였다. 아임계 조건과 비교할 때 초임계 조건에서는 수증기 개질반응이 더 활발히 일어나고 생성된 수소가 오일샌드의 추출에 참여함으로써 역청의 회수와 황 제거율을 증가시켰다. 오일샌드 처리의 반응시간은 1 hr 이내에 평형에 도달하였고, 최대 역청 수율은 초임계 조건인 380°C , 25와 30 MPa에서 약 22%였으며, 오일샌드에 함유된 황 또한 초임계 영역에서 최대 40% 제거 가능하였다.

감 사

본 논문은 에너지기술연구원 기본사업 '비재래형 석유계 연료의 고품위화 기술개발' 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Canada, National, Energy and Board. *Canada oil sands: opportunities and challenges to 2015*, Publications Office, National Energy Board, Calgary(2004).
2. Demainson, G. J., *Tar sands and supergiant oil fields.*, CIM Special(1978).
3. Berkowitz, N. and Calderon, J., "Extraction of Oil Sand Bitumens with Supercritical Water," *Fuel Processing Technology*, **25**(1), 33-44(1990).
4. Ogunsola, O. M. and Berkowitz, N., "Extraction of Oil Shales with sub- and Near-critical Water," *Fuel Processing Technology*, **45**(2), 95-107(1995).
5. Subramanian, M. and Hanson, F. V., "Supercritical Fluid Extraction of Bitumens from Utah Oil Sands," *Fuel Processing Technology*, **55**(1), 35-53(1998).
6. Czarniecki, J., Radoev, B., Schramm, L. L. and Slavchev, R., "On the Nature of Athabasca Oil Sands," *Advances in Colloid and Interface Science*, **114-115**, 53-60(2005).
7. Park, Y.-K., Choi, W. C., Jeong, S. Y. and Lee, C. W., "High Value-Added Technology of Oil Sand," *Korean J. Chem. Eng.*, **45**(2), 109-116(2007).
8. Park, J. H., Joung, Y. O. and Park, S. D., "Sulfur Removal from Coal with Supercritical Fluid Treatment," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(2), 314-318(2007).
9. Park, J. H. and Park, S. D., "Extraction of Low Rank Coal with Sub- and Supercritical Water," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **41**(7), 590-596(2008).