

코킹 공정을 이용한 오일샌드 癩靑의 熱化學적 轉換†

‡李時勳 · 尹相竣 · 李載區 · 金在浩

韓國에너지技術研究院

Thermochemical Conversion of Oil sand Bitumen in Delayed Coking Reactor†

‡See-Hoon Lee, Sang-Jun Yoon, Jae-Goo Lee and Jae-Ho Kim

Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Daedeok-gu, Daejeon 305-343, KOREA

요 약

석유를 대체할 수 있는 자원 중의 하나인 오일샌드 역청의 열화학적 전환을 통해 생산된 연료유 특성을 열천칭 분석기와 중질유들의 전환 공정에 사용되는 딜레이드 코킹 반응기(600 ml)를 이용하여 분석하였다. 동일한 50°C/min의 승온 속도로 최종 코킹 온도를 400~550°C까지 변화시킨 결과, 최종 코킹 온도가 증가할수록 코킹이 완료되는 시간과 전환률이 증가하였다. 그러나 450°C 이상의 온도에서는 미비하게 증가하여 코킹 운전이 적어도 450°C 이상이 되어야 함을 알 수 있었다. 딜레이드 코킹 반응기의 최대 액체 수율은 475°C의 조건으로 나타났으며 코킹에 의해 생성되는 오일의 API, SIMDAS 분석을 통해 경질화가 진행되어 일반적인 디젤과 비슷한 연료 특성을 가짐을 확인하였다.

주제어 : 열화학적 전환, 오일샌드 역청, 코킹, 연료유

Abstract

The study of coking technology to upgrade oil sand bitumen which is considered as alternative fuel was performed by using thermogravimetry analyzer and delayed coking reactor(600 ml). To analyze and compare coking characteristics of oil sand bitumen, the reactivities of oil sand bitumen were measured in the TGA. At the temperature conditions of 400~550°C and the temperature rising velocity of 50°C/min, the termination time of coking reaction and conversion efficiencies increased with an increase of bed temperature. However the increase rate decreased over 450°C. So the coking reaction with oil sand bitumen might be over 450°C. Also the termination time decreased with increasing the temperature rising velocity. But the content of coke increased with increasing temperature rising velocity. At the experiments in the delayed coker, the temperature condition at maximum oil yield was 475°C and the fuel properties of oil from coking reaction was almost equal with conventional diesel. It was verified that the coking process might be useful process to upgrade the oil sand bitumen by using API and SIMDAS.

Key words : Thermochemical conversion, Oil sand bitumen, Coking, Fuel

1. 서 론

최근 1배럴당 100\$을 넘나드는 고유가는 석유를 대체할 수 있는 자원에 대한 개발을 적극적으로 검토하게 만들고 있다. 특히 석유 정제 설비를 이용할 수 있으며

가채굴량이 석유보다 풍부한 오일샌드, 오일셰일 등이 가장 유력한 자원으로 떠오르고 있다. 지금까지 이용된 SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage) 방법을 이용하여 오일샌드로부터 역청을 추출하고 추출된 역청의 upgrading 공정에 소요되는 상당한 양의 스팀과 수소를 제조하기 위하여 방대한 양의 천연가스가 필요하지만 현재의 고유가는 오일샌드에 대한 개발을 부추기고 있는 상황이다^{1,2)}. Fig. 1에서 알 수 있듯이 역청의 생산

† 2008년 1월 22일 접수, 2008년 4월 7일 수리

‡ E-mail: donald@kier.re.kr

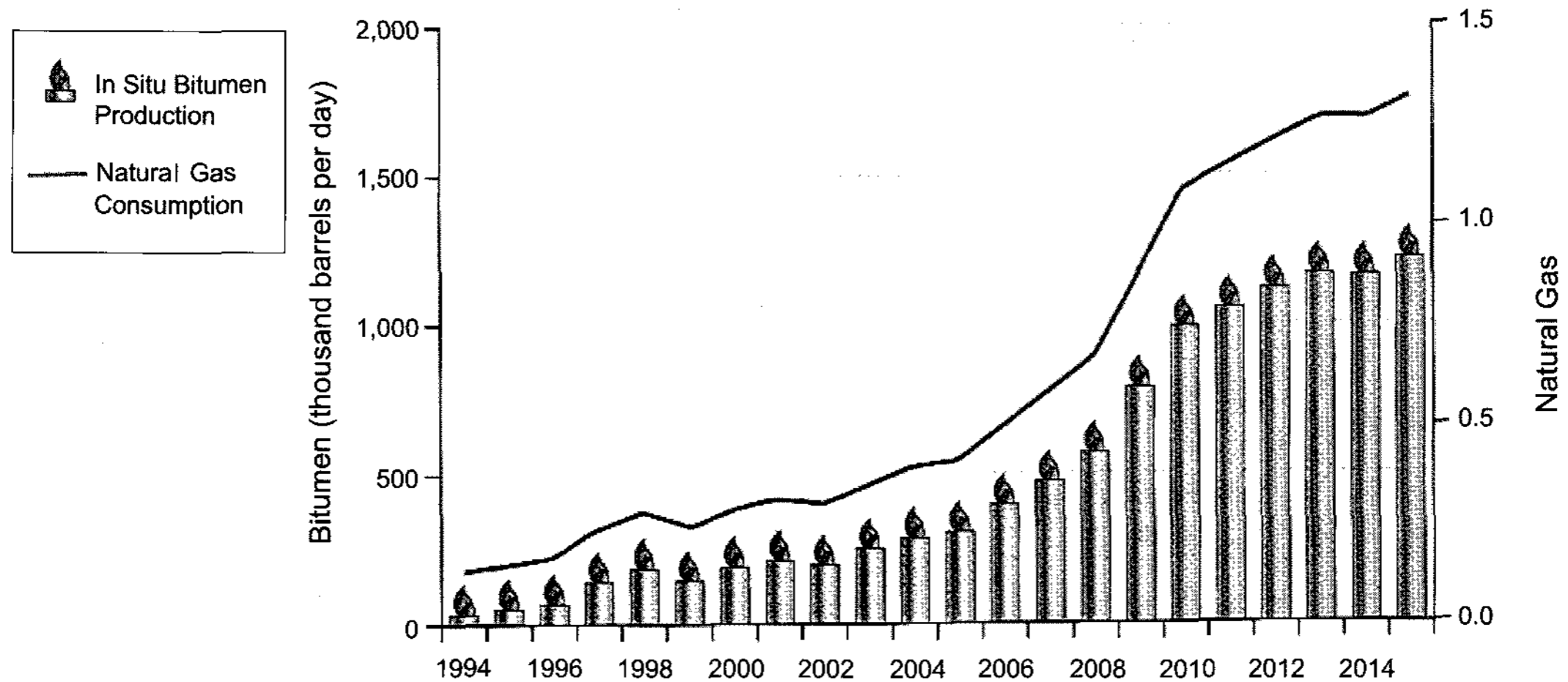


Fig. 1. In-situ bitumen production and natural gas consumption.

공정과 upgrading에 필요한 천연가스의 소비량은 캐나다 알버타주의 총 천연가스 생산량과 비슷한 수준이다.

오일샌드의 upgrading 과정은 추출을 통하여 생성된 오일샌드 역청유를 증류과정을 통하여 경질유분을 생성하고 하분의 중질성분으로부터 경질유 수율을 향상시키기 위하여 열을 가하여 경질유분과 코크스로 분리하는 공정을 말한다^{2,3}). Mildred Lake산 오일샌드의 경우에 10.5%의 역청이 함유되어 있으며, 이중 오일 50-60%, resin 30-35%, 아스팔트 15-25% 으로 구성되어 있다⁴).

코킹(coking) 공정은 높은 아스팔트와 금속성분을 포함하는 오일샌드 역청을 취급하기 위해 설계된 열분해 공정이다. 역청유 잔사성분에 존재하는 불순물들이 촉매를 비활성화하고 피독시키기 때문에, 오일샌드 역청을 정유 설비에서 직접 사용하기 어렵다. 코킹공정으로부터 제조되는 제품은 원료의 타입과 공정조건에 따라 상당히 다르며 대표적인 코킹공정으로는 딜레이드 코킹(Delayed coking), 유동 코킹(Fluid coking), 플렉시 코킹(Flexicoking) 공정이 있다^{5,6,7}).

유동 코킹 공정은 제조된 코크스의 일부가 공정 가열 용으로 사용되는 것으로 분해반응은 가열기와 유동층 반응기에서 이루어진다. 반응온도는 약 520°C이며, 코크스 전환은 순간적으로 이루어지나 높은 유황함량, 낮은 휘발성, 나쁜 결정구조, 낮은 분쇄지수 등의 단점이 있어 유동코킹은 대부분의 석유코크스 시장에 적합하지 않은 것으로 인식되고 있다. 플렉시 코킹은 유동코킹과 가스화가 통합된 공정으로 필요한 열원을 가스화로부터 얻는다. 가스화를 통한 수소 생산 등의 장점이 있으나

시설비가 많이 드는 단점이 있다. 딜레이드 코킹은 회분식 반응기들을 연속적으로 이용하는 공정으로 한 반응기에 코크스가 채워지면 다른 반응기에 원료 주입을 전환시키게 된다. 딜레이드 코킹의 운전조건은 480-500°C로 알려졌으며 너무 낮은 온도에서는 스펀지 형태의 코크스가 제조된다^{8,9}).

딜레이드 코킹 기술의 경우 가장 오랜 기간 동안 이용된 공정으로 공정의 안정성이 높고, 위험부담이 적다는 큰 장점을 갖고 있어 오일샌드의 경질화를 측정하기에 매우 적합하다. 이에 따라 본 연구에서는 기존의 원유와는 특성이 매우 다른 고유황, 초중질유인 오일샌드 역청의 코킹 특성을 열천칭 분석기(TGA)와 실험실 규모로 제작한 코킹 반응기를 이용하여 실험하였다. 또한 코킹 반응을 통해 생산된 오일 성분의 연료 특성을 분석하고 상업적으로 이용되고 있는 디젤과 비교하였다.

2. 시료 및 실험방법

오일샌드 역청의 온도에 따른 코킹 반응 특성을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 TGA(Setram Co.) 장치를 이용하였다¹¹). 실험에 사용한 TGA는 1,700°C까지 온도 상승이 가능하며 중량측정은 최대 10 g, 감도는 0.1 μg 까지이며, 등온 및 비등온 실험이 가능하다. 초기 TGA basket 내 시료의 무게는 평균 19~20 mg이며, 이 조건에서의 시료무게에 대한 변수는 TGA결과에 영향을 주지 않았다. TGA 실험온도는 일반적인 코킹 조건으로 적용되는 온도범위인 400~550°C로 설정하였으며, 질소

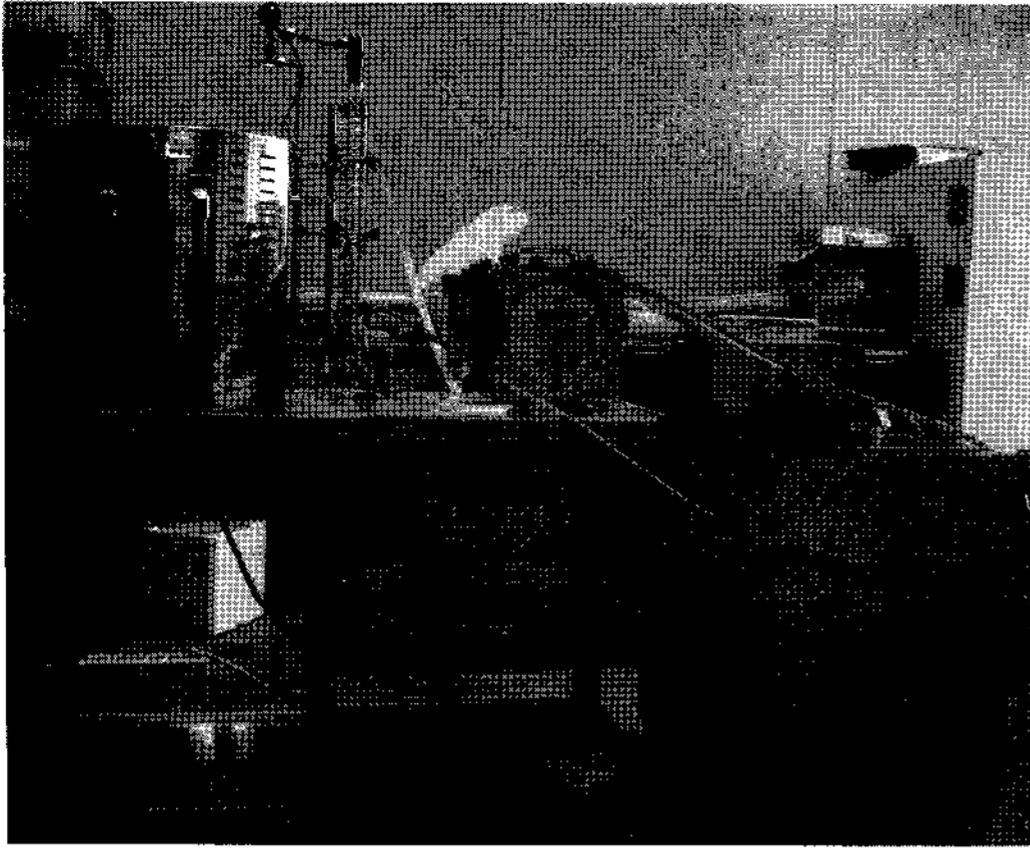


Fig. 2. Lab-scale delayed coking reactor.

의 유량은 모든 실험조건에서 동일하게 100 ml/min으로 고정하였다. 또한 시료의 무게변화는 전자식 저울과 컴퓨터를 이용하여 2.6초의 일정한 시간 간격으로 측정하면서 data를 저장하였다.

오일샌드 역청 고품위화 기술로서 가장 널리 이용되고 있는 딜레이드 코킹 공정을 이용한 생성유 및 수율 특성을 비교, 확인하기 위하여 실험실 규모의 코킹 시스템을 제작하였으며 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 딜레이드 코킹 반응기는 등온 유지가 가능한 600 ml 용량의 반응기와 오일 포집부 및 냉각 공정, 가스 유량 측정 및 생성 가스 분석을 위한 GC로 구성되어 있다. 실험에 사용한 시료는 Suncor사에서 제공한 Athabasca 오일샌드 역청으로 기본 물성을 Table 1에 나타내었다. 코킹 공정 후에 생성되는 오일의 경질화 정도를 비교하기 위한 평균 분자량 분석은 Waters GPC를 이용하였다. 측정을 위하여 사용한 용매는 THF, 컬럼은 PL gel Mixed-D(7.8×300 mm) 이었다. 초기 35 °C의 온도와 1.0 ml/min의 유속 조건을 이용하였으며 100 µl의 시료를 주입하였다.

코킹 공정을 이용한 오일샌드 역청의 경질화 실험은 다음과 같은 순서로 진행된다. 600 ml 용량의 반응기에 ±0.01 g의 정확도를 갖는 저울로 100~150 ml 부피의 질량을 측정된 오일샌드 역청을 넣은 후, 온도 승온을 위하여 furnace 내부로 장착시킨다. 400~550°C의 원하는 코킹 온도조건으로 가열로를 승온시키면서 반응기 내부에 생성되는 기체의 원활한 배출을 위하여 200 ml/min의 유속으로 비활성기체(Ar)을 MFC를 이용하여 일정하게 주입하여 주었다. 반응기 내의 온도는 오일샌드 역청 시료에 접해 있는 k-type thermocouple로 확인하였다. 반응기 내 온도가 상승함에 따라 생성되는 휘발분은 Ar 기체와 함께 반응기 밖으로 배출되며, 10°C 정도의 저온으로 유지되는 응축기를 통하여 액체 생성물(경질화된 유분)은 플라스크에 응축된다. 이때 응축되지 않는 배출가스(H₂, CO, CH₄, CO₂, 등)의 양은 습식가스미터로 측정되며, 성분의 정량적인 함유량은 GC(HP 6890)를 통하여 분석하였다. 원하는 코킹 온도 조건까지 승온된 후에는 1시간 정도 안정화 시간을 준 후 실험을 종료하였으며, 반응기 내 남아있는 코크스는 회수 후 무게를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

코킹 반응은 오일샌드로부터 생산되는 역청을 고품질화하는 반응으로서 일부에서 소량으로 이용되었으나 석유 가격의 상승으로 인한 오일샌드 생산량의 증가는 새로운 고효율 코킹 기술의 개발을 이끄는 원동력이 되고 있다. 오일샌드 역청의 경질화를 향상시키기 위한 코킹 반응 특성을 온도별로 고찰하여 Fig. 3에 나타내었다. 승온속도는 50°C/min으로 일정하게 하였으며 휘발되는 물질의 원활한 배출을 위하여 질소를 100 ml/min 속도로 주입하였다. Fig. 3에서 W/W₀는 초기 시료 무게를 측정 시간의 무게로 나눈 질량비이다.

Table 1. Properties of Athabasca oil sand Bitumen

Item	Contents
1	Elemental Analysis C : 84.45 wt%, H : 9.77 wt%, N : 0.35 wt%, S : 5.41 wt%, O : 2.40 wt%
2	Calorific Value 9,690 kcal/kg
3	B.P. Distribution 114~612°C (ASTM D 2887)
4	Viscosity 10 cP (at 30°C)~58,000 cP (at 200)
5	API Specific Gravity 8.32 (ASTM D 287, KS M 2002)
6	Asphaltene 10.86 wt% (ASTM D 3279, KS M 2415)

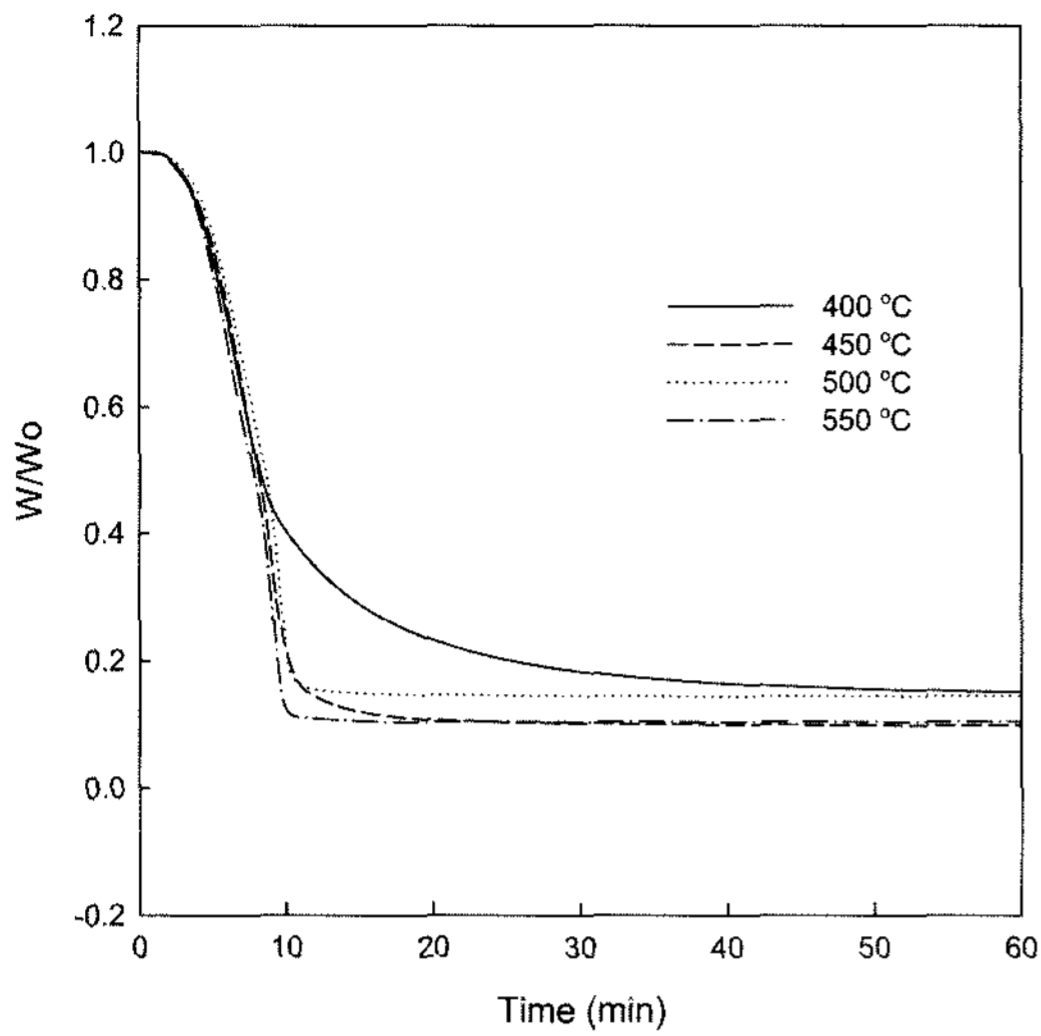


Fig. 3. Weight fraction with coking temperature (dT/dt: 50°C/min).

Fig. 3에서 알 수 있듯이, 100°C부터 오일샌드 역청에 함유된 소량의 수분이 증발되면서 무게감량이 시작되어 200°C 이상의 온도조건에서는 다량의 휘발성분의 휘발화로 인하여 급격한 무게감량이 발생하여 500°C까지 유지되었다. 이는 곧 오일샌드 역청에 함유된 휘발분(가스 및 경질유분)의 온도분포가 100~500°C 범위로 넓은 영역의 비점 분포를 보인다고 할 수 있다. 온도조건이 400°C로 상대적으로 낮은 온도조건에서는 코킹이 완료되는데 필요한 시간이 450°C의 경우보다 대략 40~50분이 추가로 소요됨을 알 수 있으며, 450°C 이상의 조건에서는 시간차이가 적어져서 500°C이상의 온도에서는 거의 비슷한 코킹 운전 시간이 필요함을 확인하였다. 따라서 동일한 승온 속도 조건에서 코킹을 통한 역청의 전환율을 향상시키기 위해서는 반응 온도를 450°C 이상으로 유지해야 함을 알 수 있었다. 또한 코크스로의 전환을 최소화하고 액체 생산물을 극대화하기 위해서는 적어도 10분 이상의 코킹 반응 시간이 필요함을 알 수 있었다.

오일샌드 역청의 코킹 반응 특성을 고찰하기 위하여 100~150 ml 정도의 질량을 측정된 오일샌드 역청을 코킹 반응기에 넣은 후, 400~550°C의 원하는 코킹 온도 조건으로 가열로를 승온시키면서 실험이 이루어졌다. TGA 실험에 따라서 450°C 이상의 조건에서 코킹 반응 실험을 해야 액체 생성물의 수율을 극대화할 수 있었으나, 반응 온도별 생성되는 액체의 경질화를 비교하기 위

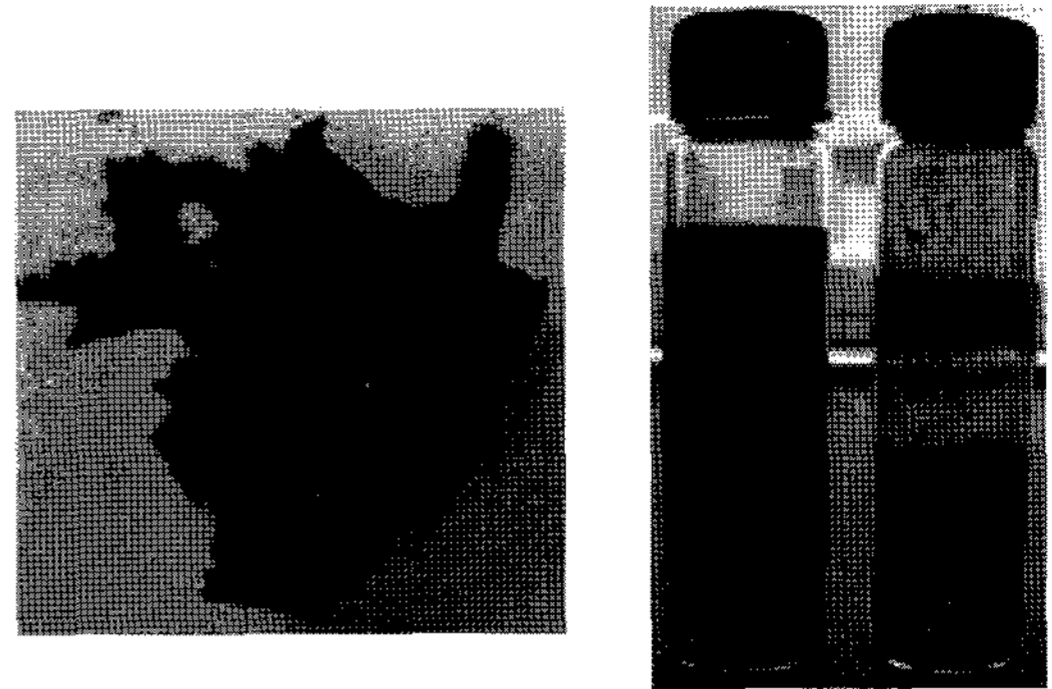


Fig. 4. Cokes and oil sample from delayed coking process.

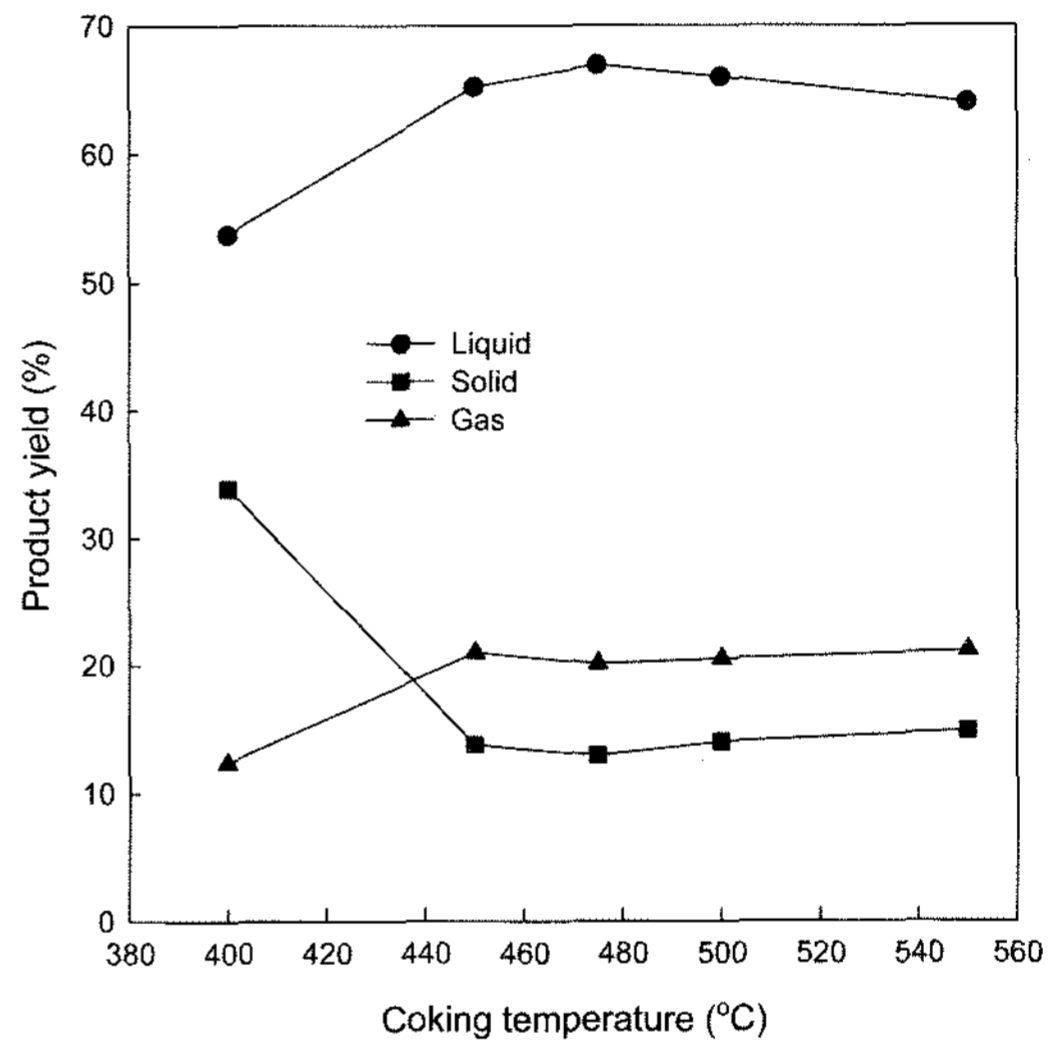


Fig. 5. Yields of coking products with temperature.

하여 코킹 반응기 실험에서는 400~550°C의 반응 영역에서 실험을 진행하였다. 코킹 반응 실험에서 배출되는 코크스와 액체 생성물을 Fig. 4에 나타내었다. 왼쪽 사진에서 코크스를 보면 매우 미세한 기공을 갖는 형태로 휘발분이 휘발화되고 있음을 알 수 있다. 오른쪽 사진은 코킹 반응에 따라 만들어지는 오일과 코크스를 갈아서 만든 시료로서 수분 함량 및 조성의 차이를 제외하고 바이오매스의 열분해에 의한 오일과 색깔이 비슷하였다¹²⁾. 이를 통해서 오일샌드 역청의 코킹 반응은 일종의 열분해 반응임을 알 수 있었다.

400~550°C의 코킹 온도조건을 변화시키면서 회수되는 생성물의 수율을 측정하였으며, 이의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 400°C의 낮은 코킹 온도조건에서는 고체 생성물(코크스)의 생성이 34% 정도로 상당히 많았

Table 2. GPC results

Temperature	Mn ^{a)}	Mw ^{b)}	Mp ^{c)}	Mw/Mn ^{d)}
400°C	183	281	265	1.53
450°C	130	235	210	1.81
475°C	149	259	217	1.74
550°C	141	266	193	1.88

- a) Mn : Number average molecular weight
- b) M_w : Weight average molecular weight
- c) M_p : Maximum peak molecular weight
- d) Mw/Mn : Distribution ratio
- e) Standard : Polystyrenes

으며, 유효 성분인 액체 및 기체생성물은 각각 54%, 12% 정도로 상대적으로 낮은 생성량을 보였다. 코킹 온도가 증가함에 따라 액체와 기체 생성물의 양은 증가하였으며, 고체생성량은 상당히 감소하는 효과를 보였다. 특히 475°C의 코킹 온도조건에서는 고체, 액체, 기체 생성물의 비율이 각각 13%, 67%, 20%로 높은 유효성분 생성을 보였다. 이후 475°C 보다 높은 온도조건에서는 오히려 서서히 고체생성물이 증가하고, 액체생성물이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과를 통하여 오일샌드 역청의 고품위화를 위하여 딜레이드 코킹 공정을 적용하는 경우 475°C의 코킹 온도 조건이 가장 많은 경질유 확보가 가능하고, 코크스의 생성량을 저감시킬 수 있는 최적의 조건임을 확인하였으며 65% 이상의 경질유 회수율을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

코킹 반응에 따라서 배출되는 오일 성분의 경질화 정도를 측정하기 위한 기초 분석으로 GPC를 이용하여 평균 분자량을 조사하였다. Table 2의 결과를 보면 수 평균 분자량은 130-183 이었으며 코킹 반응 온도에 따라서 경질화가 더욱 많이 진행되었음을 알 수 있다.

또한 코킹 온도에 따라 생성된 액체 생성물의 품질을 확인하기 위하여 API 비중을 측정하여 Table 3에 나타내었다. 일반적으로 초중질의 오일샌드 역청의 경우 API 비중값이 8 정도이며, 디젤유가 30정도를 보인다. 코킹 반응을 통해서 만들어지는 오일은 오일샌드 역청보다 뚜렷한 경질유 특성을 보였다. 또한 코킹 온도조건이 낮은 경우 휘발온도가 낮은 유분만이 확보됨으로써 상대적으로 API 비중이 낮은 경질유가 나왔으며, 이후 온도가 증가함에 따라 휘발온도가 높은 중질유분이 함유되어 API 비중이 낮은 값을 보였다.

코킹 온도조건에 따라 생성된 액체 생성물의 비점 분포를 확인을 통한 경질화 정도를 평가, 비교하기 위하

Table 3. Densities and API Specific gravities of oil samples

Temperature (°C)	Density (g/cm ³)	API Specific gravity
400	0.930	20.59
450	0.946	17.94
475	0.956	16.37
500	0.957	16.26
550	0.958	16.00

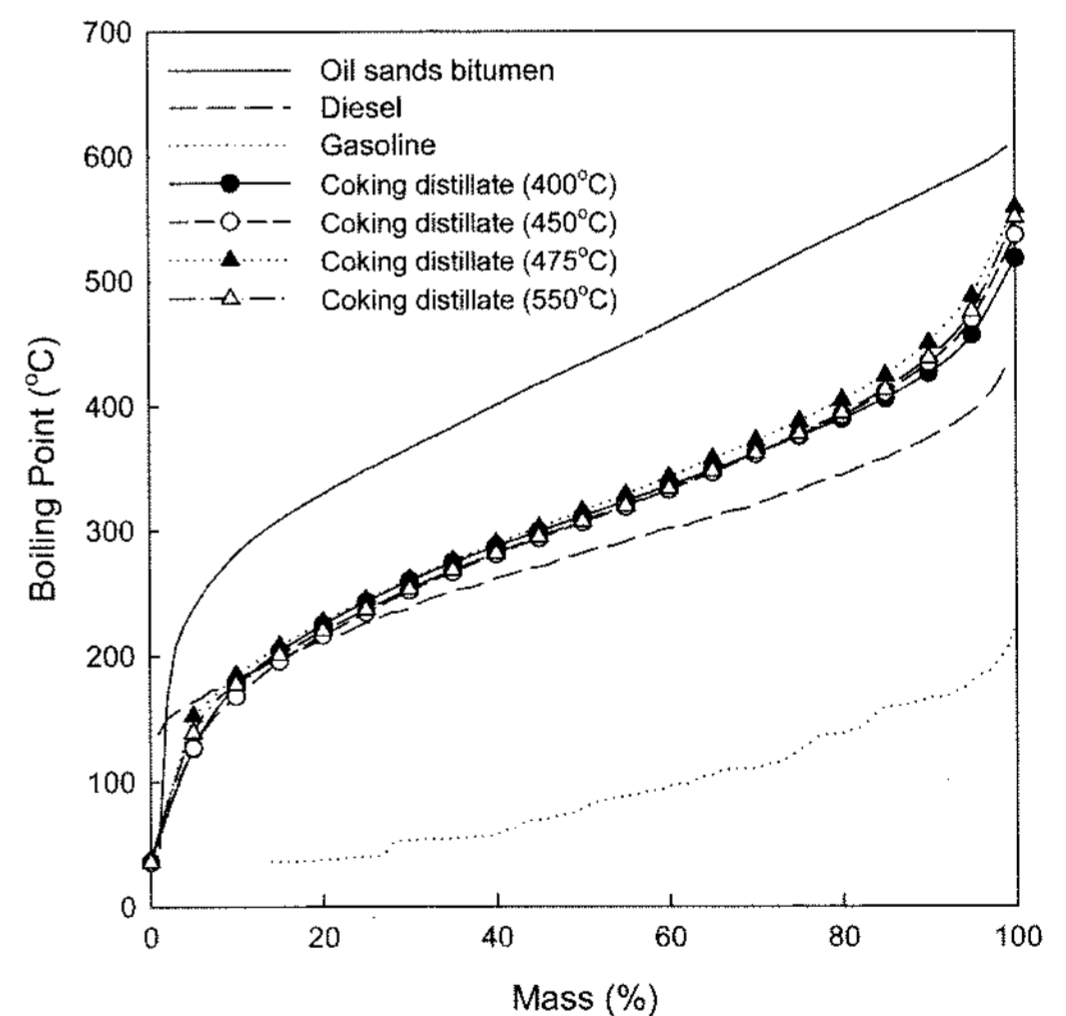


Fig. 6. Boiling point of various oil samples.

여 ASTM D2887 규격에 따라 SIMDIS를 이용하여 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

전체적으로 오일샌드 역청보다 상당히 낮은 비점분포를 갖는 상태를 보였으며, 디젤유보다는 약간 높은 비점분포를 보였다. 상기 결과를 통해서도 코킹 공정을 통

하여 오일샌드 역청으로부터 경질화된 유분을 확보할 수 있으며, 디젤과 유사하거나 약간 중질의 유분 특성을 보였다. 또한 코킹 온도에 따라 거의 유사한 비점분포를 보였으나, 온도가 낮을수록 비점 분포가 약간 낮은 경질유를 얻을 수 있었다.

Fig. 7에는 코킹 온도에 따라 생성된 오일의 SARA 분석 결과를 나타내었다. Fig. 7을 보면, 오일샌드 역청의 아스팔트 및 수지 성분이 비교적 높았으나 코킹 반응을 통해서 경질화되어 감소함을 눈으로 확인할 수 있다. 특히 아스팔트 성분의 경우 거의 경질화되어 없어짐을 알 수 있다.

코킹 후 생성된 코크스의 코킹 온도조건별 특성 분석을 위하여 TruSpec Elemental Analyzer.(LECO Co., USA), TGA-701 Thermogravimeter.(LECO Co., USA), SC-432DR Sulfur Analyzer.(LECO. Co., USA), Parr 6320EF Calorimeter.(PARR Co., USA)를 이용하여 원소, 공업, 유황분 및 발열량을 분석하였으며 그 결과를 Table 4에 보였다. 낮은 코킹 온도조건에서는 코크스 내

잔류하는 고비점의 유분이 함유되어 있어서 매우 높은 발열량 값을 보였으며, 휘발분의 함량도 상대적으로 높았다. 반면 코킹 온도가 증가함에 따라 휘발분 및 발열량이 감소하는 경향을 보였다. 특히 550에서 생성된 코크스의 경우 휘발분 함량이 크게 감소하였으나 고정탄소량이 90% 이상으로 증가하였다. 오일샌드 역청 내 함유된 유황분의 경우 5% 정도를 보이는데 본 실험에서 측정된 코크스의 경우 7% 이상의 농축된 유황분을 함유하고 있었다. 이와 같은 분석 결과는 역청 내 유황분의 대부분이 고체형태인 코크스로 농축되며, 액체 및 기체 생성물에는 상대적으로 유황 함량이 적어짐을 의미한다.

4. 결 론

고유황, 초중질의 오일샌드 역청의 연료 특성을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 TGA와 딜레이드 코킹 반응을 이용하여 400~550°C의 온도조건에서 오일샌드 역청의 코킹 반응을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 역청의 코킹 반응을 통해서 만들어지는 코크스는 매우 미세한 기공을 갖는 형태로 휘발화 되었다. 또한 코킹 온도가 증가함에 따라서 액체와 기체의 양은 증가하였으며, 고체는 상당히 감소하는 경향을 나타내었다.
2. 475°C의 코킹 온도조건에서는 고체, 액체, 기체 생성물의 비율이 각각 13%, 67%, 20%로 높은 액체와 기체 회수율을 보였으며, 이후 475°C 보다 높은 온도조건에서는 오히려 서서히 고체생성물이 증가하고, 액체 생성물이 감소하는 경향을 보였다.
3. 오일샌드 역청의 고품위화를 위하여 딜레이드 코킹 공정을 적용하는 경우 475°C의 코킹 온도 조건이 가장 많은 경질유 확보가 가능하고, 코크스의 생성량을 저감시킬 수 있는 최적의 조건임을 확인하였으며, 65%

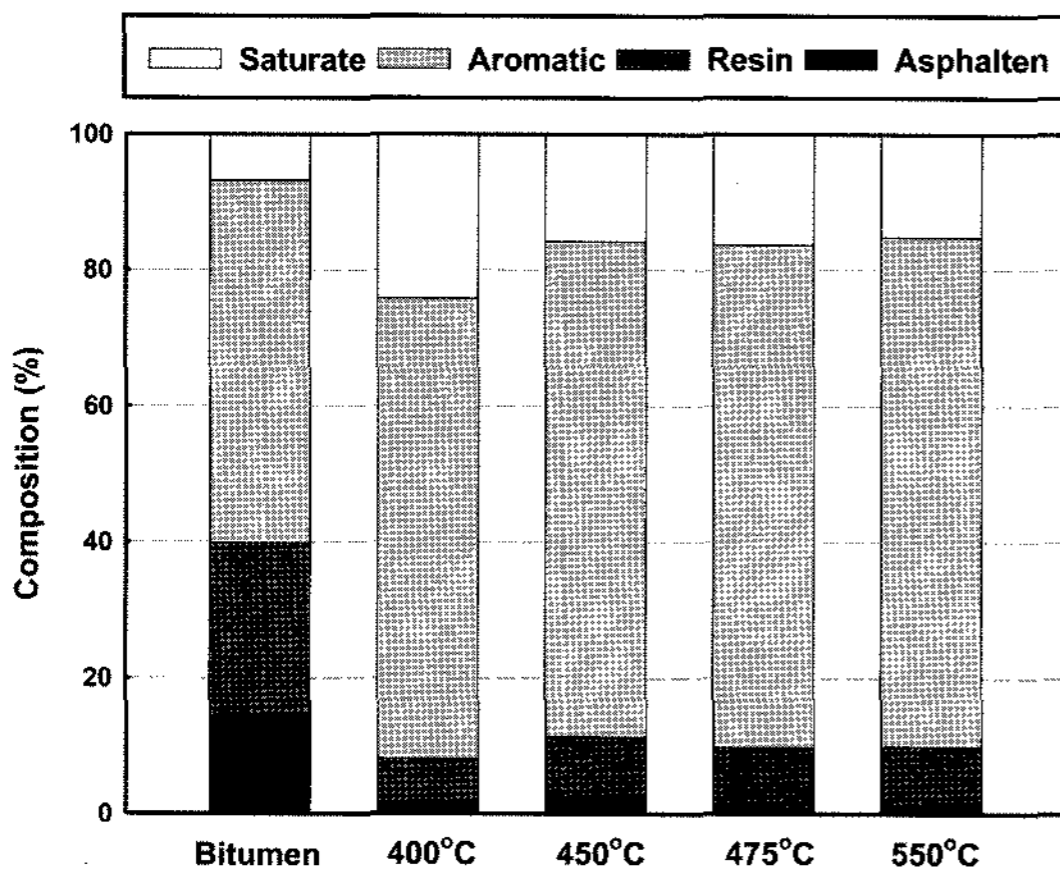


Fig. 7. SARA analysis of oil samples.

Table 4. Proximate and elemental analysis of coke samples

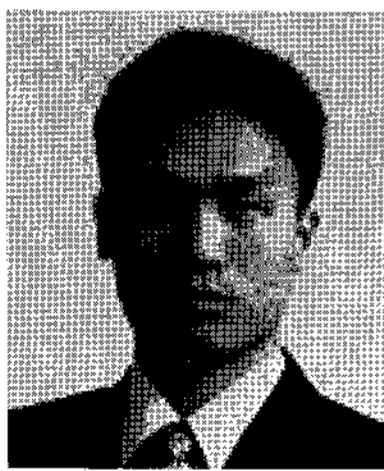
Temp. (°C)	Proximate analysis(wt%)				Elemental analysis(wt%)					Calorific value (kcal/kg)
	Moisture	Volatile matter	Ash	Fixed carbon	C	H	N	O	S	
400	0.69	11.02	0.35	87.94	85.53	5.38	0.62	0.93	7.19	9,490
450	0.70	10.51	0.55	87.94	85.85	4.57	1.30	0.02	7.71	8,710
475	0.71	11.33	0.45	87.51	85.15	4.47	1.63	0.79	7.51	8,560
500	0.76	11.19	1.23	86.82	84.05	5.71	0.61	0.04	8.36	8,470
550	1.34	6.06	0.92	91.68	85.65	4.48	1.52	0.13	7.30	8,260

이상의 경질유 회수율을 확보할 수 있었다.

4. API 비중 측정을 통하여 코킹 공정을 통해 생산된 오일이 오일샌드 역정보다는 경질화됨을 확인하였다. 또한 SIMDAS 분석을 통하여 오일이 오일샌드 역청의 비점보다 낮았으며 일반적으로 판매되고 있는 디젤의 비점과 비슷함을 확인하였다.

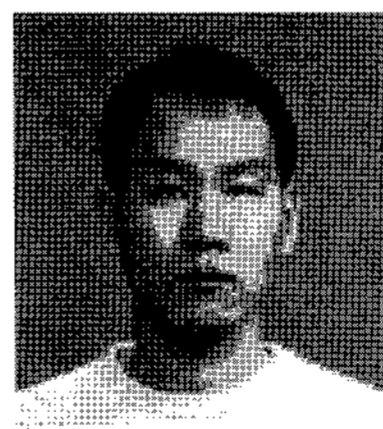
참고문헌

1. Stonehouse, D. and Jaremko, D., 2006 : *Bitumen busters- Upgrading oil sands adds value, creates new market*, Alberta's Heavy Oil and Oil Sands, Alberta Government, Canada.
2. Furimsky, E., 2003 : *Emissions of carbon dioxide from tar sands plants in Canada*, Energy & Fuels, **17**, pp. 1541-1548.
3. Phillips, C. R. and Chao, K. S., 1977 : *Desulphurization of athabasca petroleum coke by chemical oxidation and solvent extraction*, Fuel, **56**, pp. 70-72.
4. Furimsky, E., 1985 : *Gasification reactivities of cokes derived from athabasca bitumen*, Fuel Proc. Tech., **11**, pp. 167-182.
5. Dutta, R. P., McCaffrey, W. C., Gray, M. R. and Muehlenbachs, K., 2001 : *Use of 13C tracers to determine mass-transfer limitations on thermal cracking of thin films of bitumen*, Fuel Proc. Tech., **15**, pp. 1087-1093.
6. Kelemen, S. R., Siskin, M., Gorbaty, M. L., Ferrughelli, D. T., Kwiatek, P. J., Brown, L. D., Eppig, C. P., and Kennedy, R. J., 2007: *Delayed coker coke morphology fundamentals: Mechanistic implications based on XPS analysis of the composition of vanadium- and Nickel-containing additives during coke formation*, Energy & Fuels, **21**, pp. 927-940.
7. Rodriguez, J., Tierney, J. W., and Wender, I., 1994 : *Evaluation of a delayed coking process by 1H and 13C N.M.R. spectroscopy: 1. Material balances*, Fuel, **73**, pp. 1863-1869.
8. mer, G., Rudnick, L. R., and Schobert, H. H., 2006 : *Delayed coking of decant oil and Coal in a laboratory-scale coking unit*, Energy & Fuels, **20**, pp. 1647-1655.
9. Siskin, M., Kelemen, S. R., Gorbaty, M. L., Ferrughelli, D. T., Brown, L. D., Eppig, C. P., and Kennedy, R. J., 2006 : *Chemical approach to control morphology of coke produced in delayed coking*, Energy & Fuels, **20**, pp. 2117-2124.
10. Rodriguez-Reinoso, F., Santana, P., Palazon, E. R., Diez, M. A., and Marsh, H., 1998 : *Delayed coking: Industrial and laboratory aspects*, Carbon, **36**, pp. 105-116
11. 이시훈, 최영찬, 이재구, 김재호, 2004 : *농임산 폐기물의 열분해에서 승온속도 영향 연구*, 한국폐기물학회지, **21**, pp. 465-471.
12. 이선훈, 엄민섭, 유경선, 이영수, 김남찬, 이시훈, 이재구, 김재선, 2006 : *유동층 열분해로에 의하여 생산된 상수리 나무 바이오오일의 특성*, 자원리사이클링학회지, **15**, pp. 3-11.



李 時 勳

- 1996 한양대학교 화학공학과 공학사
- 1998 KAIST 화학공학과 공학석사
- 2003 KAIST 생명화학공학과 공학박사
- 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원



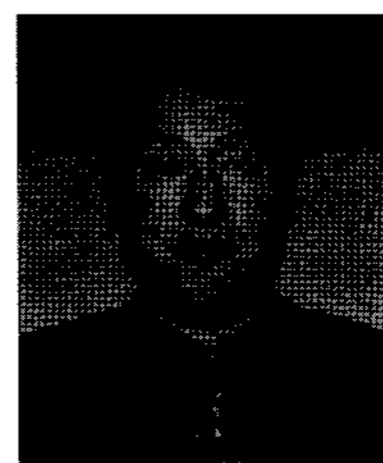
尹 相 竣

- 1998 서강대학교 화학공학과 공학사
- 2000 서강대학교 생명화학공학과 공학석사
- 2004 KAIST 생명화학공학과 공학박사
- 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원



李 載 區

- 1981년 서울시립대학교 화학공학과 공학사
- 1992년 KAIST 화학공학과 공학석사
- 1997년 KAIST 화학공학과 공학박사
- 1984-1988년 제일제당(주) 사원
- 1988-현재 한국에너지기술연구원 가스화연구센터 책임연구원



金 在 浩

- 1978 서울대학교 공업화학공학과 공학사
- 1980 한국과학기술원 화학공정공학 공학석사
- 1992 KAIST 화학공학과 공학박사
- 현재 한국에너지기술연구원 화석에너지·환경부장