

## CTL(Coal-to-Liquid) 기술 현황

정헌\* · 양정일 · 김학주 · 천동현

한국에너지기술연구원, 합성석유연구단

### The Status and Prospect of CTL (Coal-to-Liquid)

Heon Jung<sup>†</sup>, Jung-Il Yang, Hak-Joo Kim and Dong Hyun Chun

Synfuel Research Center, Korea Institute of Energy Research

#### 요 약

석탄을 합성석유로 전환시키는 석탄액화(CTL) 공장은 2차 세계대전시 독일 및 영국에서 가동되어 대량의 연료를 공급한 바 있다. 전후 대형 유전이 발견되어 값싼 석유가 공급되면서 CTL 공장의 운전은 중단되었다. 남아프리카공화국의 Sasol사만이 유일하게 1955년에 CTL공장의 조업을 시작하여 현재 하루 15만배럴의 석탄합성석유를 생산하고 있다. 최근 고유가가 지속되고 석유공급에 대한 불안감 때문에 여러 개의 석탄액화 프로젝트가 진행되고 있다. 중국은 2030년까지 석탄합성석유를 연간 3천만톤(60만배럴/일) 생산할 계획을 수립하였고, 2만배럴/일 규모의 석탄직접액화공장이 2008년 완공될 예정이다. 미국에서도 8개의 CTL 프로젝트가 진행되고 있다. 호주, 필리핀, 인도네시아, 인도 등에서도 석탄액화 프로젝트를 추진하고 있다. 석유를 전량 수입하는 우리나라도 에너지안보 차원에서 CTL에 대한 접근이 필요하다. 본고에서는 석탄액화공정의 역사, 현황 및 최근 동향 그리고 향후 전망에 대하여 기술하였다.

**주요어** : 석탄합성석유, 석탄직접액화, 석탄간접액화, CTL, Sasol

**Abstract** — During the 2nd World War, several Coal-to-Liquid (CTL) plants were operated in Germany and England to convert coal to large volumes of liquid fuel. Big oil fields discovered in the Middle East after the war supplied crude oil at the low price and all CTL plants were forced to shut down. However, South Africa (Sasol) built a CTL plant in 1955 and 2 more plants afterward and the current production of coal-derived synfuel reached 150,000 bbl/day. Recently, the sustained high crude oil price and the fear of the “peak oil” rejuvenated the interest of CTL and several CTL projects are in progress. China established a plan to build CTL plants with the total capacity of 30 million tons of synfuel per year by 2030. China is building a direct coal liquefaction plant which is scheduled to produce 20,000 bbl/day of synfuel in 2008. There are 8 CTL projects in USA either in the planning stage or in the ground-breaking stage. CTL projects are also carried out in Australia, Philippines, New Zealand, Indonesia and India. Korea needs to approach the CTL project in the perspective of the national energy security. In this paper, the history, the status, current activities and the prospect of CTL are described.

**Key words** : Coal-derived synfuel, Direct coal liquefaction (DCL), Indirect coal liquefaction (ICL), CTL, Sasol

---

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Synfuel Research Center, Korea Institute of Energy Research  
Tel: 042-860-3663  
E-mail: jungh@kier.re.kr

표 1. 1944년 독일의 석탄액화유 생산량[톤]<sup>1)</sup>

|         | 직접액화      | 간접액화    |
|---------|-----------|---------|
| 항공유     | 1,900,000 | -       |
| 휘발유     | 350,000   | 270,000 |
| 디젤유     | 680,000   | 135,000 |
| 난방용 연료유 | 240,000   | -       |
| 윤활유     | 40,000    | 20,000  |
| 기타      | 40,000    | 160,000 |

1. 석탄액화공정의 역사

석탄을 대량의 액체연료로 전환시키는 두 종류의 기술이 20세기 초에 독일에서 개발되었다. 석탄직접액화기술은 1913년에 Friedrich Bergius에 의해 특허로 등록되었고, 고온 및 고압에서 석탄을 용매에 녹여서 비등점이 높은 기름을 만드는 것으로 1927년에 상용화되었다. 영국에서도 1935년에 석탄을 creosote oil에 녹여서 연간 15만톤의 휘발유를 생산하는 직접액화공정의 조업이 시작되었다.

1925년에 Franz Fischer, Hans Tropsch와 Helmut Pichler가 직접액화의 대안으로 석탄간접액화기술을 특허 등록하였다. 간접액화는 석탄을 물, 산소와 반응시켜 수소와 일산화탄소의 혼합기체인 합성가스로 전환시키고, 이 합성가스를 코발트 촉매에 의해 반응시켜 액체 탄화수소를 만드는 기술이다. 이 액화공정은 발명자 이름을 따서 Fischer-Tropsch(FT) 공정이라고 불리며 1936년에 상용화되었다.

2차 세계대전기간 동안 영국과 독일에서는 석탄액화공장이 계속 가동되어 전쟁 수행에 필요한 연료를 생산하였다. 독일의 경우, 1945년에 9개의 간접액화공장과 12개의 직접액화공장이 가동되어 각각 연간 58만톤 및 325만톤의 연료를 생산하여 소비의 90%를 충족한 바 있다 (표 1)<sup>1)</sup>.

2차 세계대전 종전 후, 낮은 유가로 인해 석탄액화유의 경제성이 낮아지고 독일 등의 모든 액화공장들은 조업을 중단하였다. 예외적으로 남아프리카공화국은 자국 내 매장량이 풍부한 고회분 저급석탄에 적합한 석탄간접액화 방법을 선택하여 공장을 건설하였고, 액화기술을 계속 발전시키면서 조업하고 있다. 1955년에 7000배럴/일 규모의 첫 번째 공장인 Sasol 1이 Sasolburg에 건설되었고 1980년과 1982년에 80,000배럴/일 규모의 개량공장 2기(Sasol 2, Sasol 3)가 각각 건설되었다. 현재 연간 700만톤의 수송용 연료를 석탄액화에 의해 생산하여 남아프리카공화국 수송연료 수요의 27%를 충족시키고 있다.

중국은 수송연료의 수요 급증과 고유가로 인하여 자국 내 석탄을 수송연료로 전환시키기 위해 미국 HTI사

의 석탄직접액화기술을 라이선싱 하여 내몽고지역에 연간 백만톤(20,000배럴/일)의 디젤유와 휘발유를 생산하는 프로젝트가 2003년에 시작해서 2007년에 완공할 예정이다. 이 사업은 현대화된 석탄직접액화공장의 세계 최초 상용화 건설로 건설비용 및 운전결과에 대한 관심이 매우 높다. 고유가현상이 지속되면 중국의 최신 액화공장 경험을 바탕으로 전 세계에 액화공장의 건설이 늘어날 것으로 예상된다.

2. 석탄간접액화기술 현황

2-1. 개요

석탄의 간접액화기술은 고체연료인 석탄을 수증기 및 산소와 반응시켜 가스로 전환시키고, 가스화 생성물에 포함된 불순물인 먼지 및 황화합물을 제거한 합성가스를 촉매에 의해 탄화수소화합물로 전환시키는 기술이다. 반응조건 및 합성가스의 종류에 따라 철 또는 코발트 촉매가 사용된다. Sasol에서는 Fischer-Tropsch 반응에 의해 휘발유, 디젤유, 다양한 석유화학기초원료 및 왁스 등을 제조하고 있다.

간접액화기술의 핵심은 합성가스를 탄화수소로 전환하는 기술이다. 천연가스를 수증기 또는 산소와 반응하여도 합성가스가 만들어진다. 천연가스를 액체연료로 전환시키는 GTL(gas to liquid) 기술로 개발된 Mobi사의 MTG(methanol to gasoline)공정과 Shell사의 FT공정도 이론적으로는 석탄액화에 적용할 수 있다.

합성가스를 탄화수소로 전환하는 FT기술의 핵심은 성능이 향상된 촉매기술과 반응기기술이다. 원하는 제품에 따라 촉매의 종류, 반응기 형태 및 반응 조건 등이 달라지므로 선택도와 활성이 높은 촉매의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 고유 촉매를 이용한 파일럿 규모의 FT 공정 연구가 Rentech, ExxonMobil 및 Syntroleum 등에서 진행되고 있다.

2-2. Sasol 공정 현황

Sasol 공정은 독일의 Fischer-Tropsch 공정을 바탕으로 40년 이상 꾸준히 개선된 공정이다. 합성가스의 제조는 Lurgi의 고정층 가스화장치를 이용한다. 1955년 Sasolburg에 처음 지어진 Sasol 1은 7000배럴/일 규모이고 저온에서 운전되는 FT공정이다(LFT; low temperature Fischer-Tropsch). 고정층반응기와 새로운 형태의 슬러리반응기가 함께 사용된다. 철촉매를 사용하며 반응온도는 200~250°C, 압력은 20~30기압이고 파라핀과 왁스가 주로 생산된다. 1989년 Sasol 1은 반응기를 개조하여 생산품 전량을 부가가치가 높은 화학제품으로 바꾸었다. 2004년에는 원료를 석탄에서 모잠비크에서 수입한 천연가스로

바꾸어 화학제품 생산을 계속하고 있다. Sasol에서는 천연가스로부터 제조된 합성가스 전용으로 코발트 촉매를 적용한 슬러리반응기와 수소화처리공정이 조합된 SSPD (Sasol Slurry Phase Distillate)공정을 최근에 개발하였다. SSPD 공정에서 만들어진 파라핀은 옥탄가는 낮으나, 에틸렌 등을 제조하기 위한 cracking 용도로는 매우 좋다. 현재 Sasolburg에 2500배럴/일 규모의 데모 장치가 설치되어 운전되고 있다. Sasol이 GTL 사업에서도 세계적인 리더로 나설 수 있었던 이유는 Sasolburg의 Sasol 1을 왁스 생산시설로 전환시키면서 슬러리 FT 반응기를 개발하여 적용하였고, 천연가스로 원료를 전환시키면서 얻은 상용급 경험 때문이라 할 수 있다. 남아공 남부의 정부 소유 회사인 Petro SA사의 GTL 시설도 Sasol사가 제공한 기술에 의해 건설되었다. 또한 Sasol이 건설하는 Qatar의 ORYX GTL 프로젝트 및 Nigeria의 Escravos의 GTL 프로젝트도 상기 경험을 바탕으로 진행된다고 볼 수 있다.

1973년 1차 오일쇼크 이후, 남아공 정부는 Sasol에 지시하여 요하네스버그 남동쪽으로 120 km 떨어진 Secunda에 Sasol 1의 10배 크기인 Sasol 2를 1975년부터 건설하였다. 1979년 이란에 의한 2차 오일쇼크 기간 중에 Sasol 2를 복사한 Sasol 3을 건설하기로 결정하면서 Sasol사는 민영화되었다. 1980년 및 1982년에 Sasol 2 및 Sasol 3이 가동되어 현재 1일 15만배럴의 합성석유를 생산하고 있다.

Sasol에서 사용하고 있는 석탄은 회분이 21%인 저급 석탄이다(회분이 적은 고급 석탄은 수출). 하루에 12만 톤의 석탄을 인근의 탄광에서 채굴하여 사용한다. 백만 톤 규모의 석탄 아적장 2개를 운영하면서 석탄을 잘 섞어서 회분이 일정하도록 조절하여 사용한다. 압력이 29 기압으로 조절된 회분식 가스화기(Lurgi) 총 80기에 의

해 석탄가스화를 수행한다. 평균 크기가 30 mm인 석탄을 사용하며, 미분탄은 자체 발전용 연료로 사용한다 (Secunda 공장은 600MW를 자체 생산하고, 680MW는 외부에서 공급함).

[그림 1]에 Sasol 2의 공정도를 나타내었다. 5mm 이하 크기의 석탄이 가스화 되고, 합성가스는 Lurgi Rectisol 공정의 차가운 메탄올에 의해 정제된다. 슬러리상의 Fischer-Tropsch 반응기에서 제조된 생성물은 가스, 휘발유 및 디젤로 분리되고, 미반응가스와 Fischer-Tropsch 반응중 만들어진 메탄은 합성가스로 전환시켜서 재순환된다. 초창기의 Kellogg사의 순환유동층 반응기(Synthol)는 소음, 진동 및 마모 등의 문제가 많이 있었다. Sasol 엔지니어들은 유동층의 새로운 반응기를 개발하여(SAS, Sasol Advanced Synthol reactor) 1995년부터 모든 반응기를 SAS 반응기로 교체하였다. 직경이 10.7 m인 SAS 반응기 1기의 생산규모는 2만배럴/일이며 총 8기가 설치되어 있다<sup>[2]</sup>.

Sasol 2와 Sasol 3은 고온공정(HTFT; high temperature Fischer-Tropsch)으로 철촉매를 사용하며 반응온도는 300~350°C, 압력은 20~30기압이다. 고온 FT반응기의 생산물은 휘발유, 디젤, LPG, 제트유 등의 연료와, 알코올, 케톤, 아세톤, 알파-올레핀(고분자 원료) 등의 화학제품과, 프로필렌 및 에틸렌 등의 석유화학 원료로 다양하다. 메탄이 포함된 FT 반응 폐가스를 철강회사 및 제빵회사에 기체연료로 판매한다. 암모니아를 생산하여 짐바브웨에 수출하며, 폭약도 제조한다. 고온 FT 휘발유는 옥탄가가 낮아서 옥탄가를 향상하기 위한 첨가제를 주입한다. Sasol 초기에는 옥탄가를 높이기 위해 부산물인 혼합 알코올을 합성휘발유에 섞어서 판매했는데 이 혼합 알코올이 카부레이터에 문제를 일으켜서 석탄합성석유

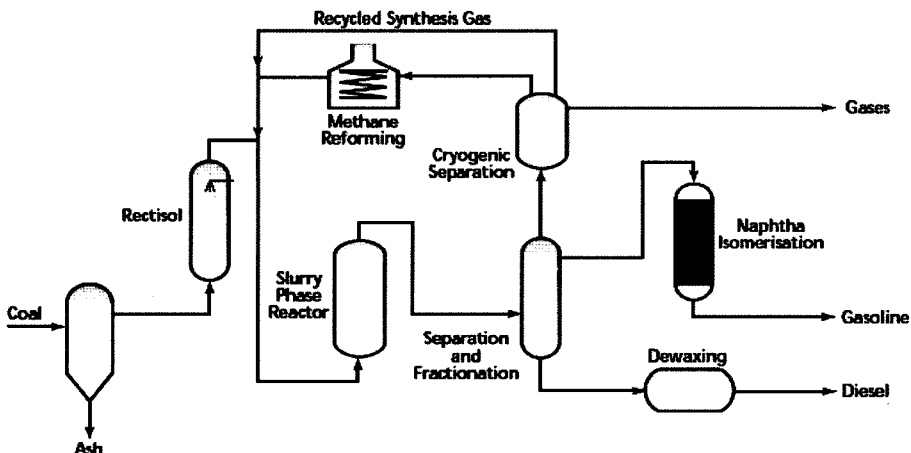


그림 1. Sasol사의 SAS 석탄간접액화 공정<sup>[2]</sup>.

표 2. 일반 디젤과 CTL 디젤의 차이점(Sasol 제공 자료).

|              | 일반 디젤      | 고온 CTL 디젤 | 저온 CTL 디젤 |
|--------------|------------|-----------|-----------|
| 에너지밀도 (g/cc) | 0.82~0.84  | 보통        | 0.763     |
| 방향족 (%)      | 11         | 20        | 0         |
| 세탄가          | 40~50      | 50~51     | 70 이상     |
| 황함량          | 95~240 ppm | 5 ppm 이하  | 5 ppm 이하  |

의 이미지가 매우 좋지 않았다. 현재는 이러한 문제가 교정되어 원유에서 얻어진 휘발유보다 성능이 더 좋다. CTL의 고온 FT반응기에 의해 합성휘발유와 합성디젤이 60:40의 비율로 직접 만들어진다. 저온 FT 반응기에서는 주로 왁스가 제조되어, 이 왁스를 수소화분해하여 합성디젤과 납사를 만든다. 따라서 고온 FT에 의해 생성된 CTL디젤과 저온 CTL디젤은 <표 2>와 같이 성상이 다르다. 저온 CTL 디젤은 세탄가가 70 이상으로 기존 디젤에 비해 크게 높으나, 에너지밀도가 낮은 단점이 있다. 고온 CTL디젤은 20%의 방향족이 포함되어 있고, 세탄가는 일반 디젤과 유사한 50~51이다. 두 종류 합성디젤 모두 황함량이 5 ppm 이하로 초저유황유이다. Sasol의 직영주유소에서는 초저유황 디젤유를 Turbo Diesel이라는 이름으로 일반 디젤유보다 비싸게 판매하고 있다. 저온 CTL 디젤을 사용하면 탄화수소, CO, NOx 등의 배출이 일반 디젤에 비해 30~50% 감소되며, 연료 사용량도 절감되는 효과가 있다.

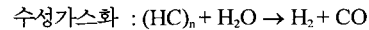
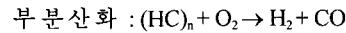
Secunda의 Sasol 2 및 Sasol 3의 생산을 위해 총 1만 5천명이 고용되며, 이중 광산인부가 6천명이다. 협력업

체까지 포함하면 15만명의 고용효과가 있다. Secunda 공장은 남아공 환경 기준뿐 아니라, 국제 환경기준에도 부합하도록 운영하고 있다. Secunda 공장의 면적은 13 km<sup>2</sup>로 매우 넓으며, 석유화학 콤플렉스와 유사하다.

2-3. 단위 공정

2-3-1. 석탄가스화공정

가스화는 탄소계 연료가 소량의 산소에 의해 부분산화되고 일부의 탄소는 스팀에 의해 수성가스화되어 일산화탄소 및 수소로 전환되는 반응이 고온(800~1,500°C)에서 일어나는 것을 말한다.



가스화기는 고체연료의 유동상태에 따라 고정층(Lurgi), 유동층(HTW) 및 분류층으로 구분한다(표 3). 가스화기에서 제조된 가스의 조성은 (표 4)와 같다. 회분을 슬래그로 제거하는 분류층가스화기가 효율 및 유지보수 측면에서 유리하여 현대식 석탄액화공정에서 주로 채택될

표 3. 가스화 장치 분류.

|          | 분류층        | 유동층       | 고정층 / 이동층 |
|----------|------------|-----------|-----------|
| 연료 형태    | 고체 및 액체    | 고체        | 고체        |
| 연료 크기    | < 500 μm   | 0.5~5 mm  | 5~50 mm   |
| 연료의 체류시간 | 1~10s      | 5~50s     | 15~30 min |
| 가스출구 온도  | 900~1400°C | 700~900°C | 400~500°C |

표 4. 석탄 가스화 플랜트의 합성가스 분석치.

| 가스화공정                |                      | 고정층    |        | 유동층   |       | 분류층    |        |
|----------------------|----------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 석탄 종류                |                      | 갈탄     | 역청탄    | 갈탄    | 역청탄   | 갈탄     | 역청탄    |
| CO <sub>2</sub>      | %Vol.                | 34.0   | 28.0   | 19.0  | 24.0  | 11.9   | 10.5   |
| CO                   | %Vol.                | 13.4   | 22.0   | 38.0  | 31.0  | 55.9   | 55.0   |
| H <sub>2</sub>       | %Vol.                | 36.2   | 38.7   | 40.0  | 41.0  | 29.6   | 32.1   |
| N <sub>2</sub> +Ar   | %Vol.                | 1.2    | 1.0    | 1.0   | 2.0   | 2.0    | 1.9    |
| CH <sub>4</sub>      | %Vol.                | 13.1   | 9.0    | 2.0   | 2.0   | 0.1    | 0.1    |
| CnHm                 | %Vol.                | 0.9    | 0.4    | -     | -     | -      | -      |
| H <sub>2</sub> S/COS | %Vol.                | 0.2    | 0.9    | -     | -     | 0.5    | 0.4    |
| Total                | %Vol.                | 100.0  | 100.0  | 100.0 | 100.0 | 100.0  | 100.0  |
| Hi                   | kJ/Nm <sup>3</sup>   | 10,875 | 10,420 | 9,810 | 9,455 | 10,130 | 10,460 |
| Hi                   | kcal/Nm <sup>3</sup> | 2,600  | 2,490  | 2,345 | 2,260 | 2,422  | 2,500  |

표 5. 탈황 공정.

| 공정 이름    | 정제 후 농도   | 불순물   |
|----------|-----------|---|
| Rectisol | 0.1~1 ppm | total sulfur (H <sub>2</sub> S + COS)         |
|          | 10~50 ppm | CO <sub>2</sub>                               |
| Purisol  | 5 ppm     | CO <sub>2</sub> byproduct 내의 H <sub>2</sub> S |
|          | 5~50 ppm  | H <sub>2</sub> S, COS 는 제거 불가                 |
| MDEA     | 3~50 ppm  | H <sub>2</sub> S, COS 는 제거 불가                 |
| aMDEA    | 1~50 ppm  | H <sub>2</sub> S                              |
|          | 5~5- ppm  | CO <sub>2</sub>                               |

것으로 예상된다. 분류층가스화기도 연료공급 방식에 따라 건식(GE Energy, ConocoPhillips사) 및 습식(Shell) 방식이 있다.

2-3-2. 정제공정

가스화에 의해 발생된 합성가스에 포함된 불순물은 황 화합물(H<sub>2</sub>S, COS), 분진, 질소화합물(NH<sub>3</sub>), 할로겐화합물(HCl 등) 및 수은 등이 있다. 분진의 제거를 위해 세 리믹필터 및 금속필터가 사용중이나 가격 및 성능 등 개선의 여지가 많다. 수은은 개량 활성탄 등을 이용하여 연소 전에 제거한다. 현재 황화합물은 상온 및 저온에서 액상의 제거제를 사용하여 제거하는 기술이 상용화 되어 있다(Amine 공정, Purisol, Rectisol 공정). 제거하고자 하는 불순물의 종류와 정제후 불순물의 농도에 따라 공정을 선택한다(표 5).

액화공정의 촉매를 보호하기 위해서는 황성분이 1 ppm 이하로 제거되어야 하므로 상용 석탄액화공정에서는 Rectisol 공정을 사용하고 있다. Rectisol 공정은 낮은 온도의 메탄올 용매를 이용하여 물리적으로 산성가스를 제거하는 공정으로 황성분을 0.1 vppm까지 제거할 수 있다. 장점으로서는 비교적 낮은 유지비용과 저렴한 용제의 사용이다. Rectisol 공정에서는 CO<sub>2</sub>도 10~50 ppm까지 동시에 제거되며 Linde와 Lurgi사가 독립적으로 개발한 라이선스를 각각 보유하고 있다.

2-3-3. 액화공정

액화공정의 운전조건에 따라 반응생성물이 달라지고, 촉매 및 반응기의 종류도 변하게 된다. <표 6>에 저온

표 6. FT 공정의 생성물 분포<sup>1)</sup>.

| 생성물       | 저온 FT 공정 (220~250°C) | 고온 FT 공정 (330~350°C) |
|-----------|----------------------|----------------------|
| 메탄        | 4                    | 7                    |
| C2-C4 올레핀 | 4                    | 24                   |
| C2-C4 파라핀 | 4                    | 6                    |
| 휘발유       | 18                   | 36                   |
| 디젤유       | 19                   | 12                   |
| 중유 및 왁스   | 48                   | 9                    |
| 산소함유 화합물  | 3                    | 6                    |

및 고온 FT 공정에서 제조된 생성물의 조성을 나타내었다. 저온 공정에서는 왁스 등 분자량이 큰 탄화수소가 많이 생성되며, 고온 FT 공정에서는 휘발유, 디젤 및 분자량이 작은 탄화수소가 많이 제조된다. 고온 FT공정에서는 유동층 SAS반응기를 사용하고, 저온 FT공정은 열전달 특성이 우수한 슬러리반응기를 주로 사용한다<sup>1)</sup>.

FT 반응용 촉매는 철과 코발트가 주로 사용된다. 코발트 촉매는 철촉매에 비해 단위 무게당 활성이 매우 높다. 그러나 코발트 촉매는 가격이 비싸고, 수소/일산화탄소 비율이 2에 근접해야 하고, 소량의 황성분에도 활성을 잃는 단점이 있다(표 7)<sup>2)</sup>. 따라서 천연가스를 전환시키는 GTL 용도의 저온 FT에 적합한 촉매로 알려져 있다. 석탄가스화에 의해 발생된 합성가스는 비교적 불순물이 많이 포함되어 정제가 고도화되어도 코발트 촉매가 오랜 수명을 유지할 수 있는가에 대한 상용 결과가 아직 발표된 바 없다. 불순물에 비교적 잘 견디고, 넓은 범위의 수소/일산화탄소 비율을 가진 합성가스를 처리할 수 있으며, 저온 및 고온 모든 온도에서 활성을 나타내는 철촉매가 현재로는 석탄액화용 FT공정에 적합한 촉매이다.

3. 석탄직접액화기술 현황

3-1. 개요

석탄직접액화기술은 고온(400~470°C) 및 고압(100~300 기압)에서 석탄을 분해하여 용매에 녹이며, 분해된 석탄

표 7. 코발트촉매와 철촉매 비교<sup>3)</sup>.

|                    | Co  | Fe  |
|--------------------|---|---|
| 가격                 | \$57300/ton   | \$252/ton   |
| support            | SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub><br>Co loading 20% | SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>Fe loading 85% |
| H <sub>2</sub> /CO | 2   | 0.66  |
| 온도                 | 200~250   | 180~350   |
| CH <sub>4</sub>    | 고온 및 H <sub>2</sub> /CO 비율에 민감  | 민감도 약하고, 알칼리가 메탄생성 감소   |
| 왁스                 | 높은 선택도  | 중간 - 높음   |
| 알코올 등              | 낮음  | 높음  |
| 산소부산물              | H <sub>2</sub> O  | CO <sub>2</sub> 및 H <sub>2</sub> O                                  |

에 촉매에 의해 수소를 공급해서 안정화시키고, 분해하여(hydrocracking) 증류가 가능한 액체연료를 만드는 기술이다. 이 공정은 열효율이 60~70%로 높은 편이다. 석탄액화유는 보일러 연료 등 연소 용도로는 특별한 처리 없이 사용이 가능하다. 그러나 액화유를 수송용 연료로 사용하려면 정유공장에서 사용되는 고품질화처리(upgrading)가 필요하다. 정유공장의 원유에 액화유를 섞어서 같이 처리할 수 있다.

석탄직접액화공정은 크게 single-stage 공정과 two-stage 공정의 2종류로 나누어진다. Single-stage 공정은 단일반응기에서 석탄의 용해와 수소화 분해가 같이 일어나도록 구성되어 있고, 대표적인 공정이 독일의 Kohleol 공정, 일본의 NEDOL 공정 그리고 미국의 H-Coal 공정 등이 있다. Two-stage 공정은 2개의 반응기가 직렬로 연결되어, 첫 번째 반응기에서는 석탄이 용매에 용해되고, 두 번째 반응기에서는 액화유가 수소화 분해 되도록 구성되어 있다. 대표적인 two-stage 공정은 미국 HTI사의 CTSL (Catalytic Two-Stage Liquefaction) 공정, 영국의 LSE (Liquid Solvent Extraction) 공정 그리고 일본의 BCL (Brown Coal Liquefaction) 공정 등이 있다<sup>[2]</sup>.

HTI는 중국의 CCRI(China Coal Research Institute)의 의뢰로 Shenhua 석탄을 사용하는 CTSL 액화공정의 타당성 조사를 1997년부터 수행하여 타당성을 입증하였다. 중국 내몽고지역에서 연간 백만톤의 디젤유와 휘발유를 생산하는 석탄직접액화 프로젝트가 HTI사의 CTSL 기술을 라이선싱 하여 2003년에 시작되었다. 참고로 독일의 Kohleol 공정과 일본의 NEDOL 공정에 관해서도 타당성 평가가 수행되었으나, 최종적으로 HTI의 CTSL 공정이 선정되었다.

표 8. 중국 Shenhua 직접액화 공장의 예상 생성물 분포.

| 생성물     | 톤 / 년     |
|---------|-----------|
| LPG     | 70,000    |
| 납사      | 320,900   |
| 디젤유     | 620,800   |
| 액상 암모니아 | 11,500    |
| 황       | 40,600    |
| 폐놀      | 3,500     |
| 합계      | 1,067,300 |

### 3-2. HTI사의 CTSL 공정

미국 HTI사는 자사의 H-Coal 공정을 개선하여 반응기 2개를 직렬로 연결한 2-stage 공정을 개발하였고, 이를 Catalytic Two-Stage Liquefaction(CTSL) 공정이라 부른다. CTSL 공정의 첫 번째 ebulated bed 반응기는 170기압 및 400~410°C에서 조업되고 재순환에 의해 유도되는 Ni-Mo/alumina 촉매에 의해 상당 부분의 석탄이 분해된다. 첫 번째 반응기에서 배출되는 반응물 전체가 두 번째 ebulated bed 반응기로 주입되어 석탄분해와 수소화 반응이 일어난다. 두 번째 반응기의 온도는 430~440°C로 약간 높게 유지된다(그림 2). 반응기 출구 물질은 상압증류탑에서 비등점 400°C까지의 유분과 탑저제품으로 분리된다. 탑저제품의 회분과 섞여 있는 용매는 고체분리기에 의해 분리되어 석탄 슬러리 제조에 사용된다. 액화유 수율은 65% 이상이다.

### 3-3. Shenhua사의 직접액화 상용 공장

중국 내몽고 Majiata에 연산 100만톤 규모의 직접액화 공장이 건설중이며 2007년 3월 현재 75%완성도이다.

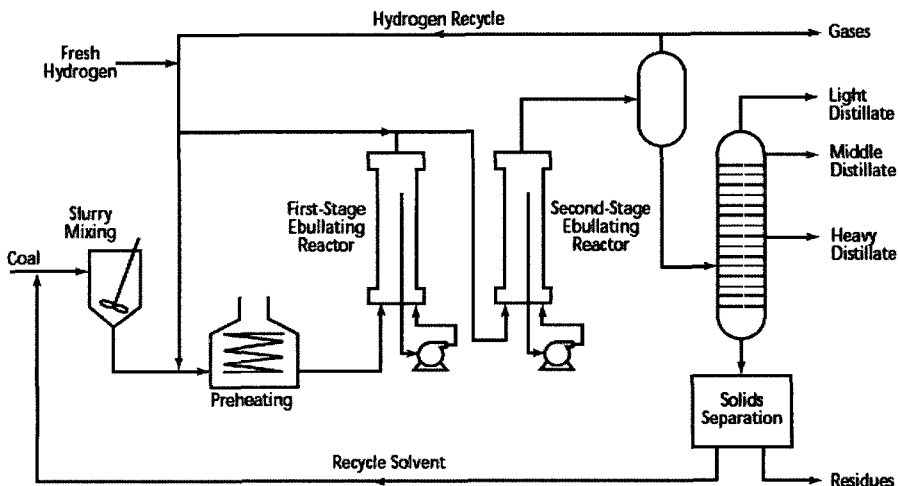


그림 2. HTI사의 CTSL 2-stage 석탄직접액화 공정<sup>[2]</sup>.

금년말에 완공되어 2008년에 시운전이 예정되어 있다. Shell사의 가스화기가 건설되어 액화반응용 수소를 생산한다. 미국 HTI기술을 바탕으로 시작하였으나, 현재는 중국 자체기술이라고 주장하고 있다. 직접액화공장에서 생산될 제품의 양은 (표 8)과 같고<sup>[5]</sup>, 전 세계가 최초로 지어지는 현대식 직접액화 공장의 성능을 주시하고 있다.

#### 4. CTL 동향

최근 유가가 높은 수준으로 유지되고, 향후 수급에 대한 불안 때문에 자국 내 석탄으로부터 액체연료를 생산하여 에너지안보를 확립하며, 동시에 높은 가격의 원유 수입을 대체하면 경제적으로 이득이라는 판단 하에 중국, 미국, 필리핀, 인도, 뉴질랜드, 호주 등 많은 나라가 CTL 사업의 타당성조사를 수행하거나, 실제 계약 단계에 있다<sup>[6]</sup>.

##### 4-1. 중국

중국은 전 세계 석탄액화(CTL) 산업의 중심지가 되고 있다. 현재 건설중인 Shenhua사의 내몽고 석탄직접액화 공장 외에도 석탄 전환사업의 수요가 많아서 2006년 12월에 중국정부(NDRC)가 2020년까지의 석탄전환 개발 상한선을 아래와 같이 정하였다<sup>[7]</sup>.

- 석탄전환 총투자비는 1조유안 이하(약 120조원)
- 석탄액화 시설규모는 3천만톤/년 이하(2.2억 배럴/년)
- 석탄 메탄올, DME 등의 시설규모는 6600만톤/년 이하

석탄액화는 직접액화 규모를 현재 연 100만톤에서 500만톤으로 늘리고 나머지 2,500만톤/년은 간접액화로 추진하려고 한다. 그 일환으로 Shenhua사는 연 400만톤 규모의 석탄간접액화 프로젝트 2개를 추진하기 위해 남아프리카공화국의 Sasol사 및 네덜란드의 Shell사와 각각 타당성조사 작업을 수행중이다<sup>[5]</sup>.

Yankuang 그룹은 100배럴/일 규모의 간접액화기술 확보하였고, 20,000배럴/일급 액화공장을 자체기술로 건설하기 위한 허가를 신청중이다<sup>[8]</sup>. Institute of Coal Chemistry에서 독립된 Synfuels China사에서는 3500배럴/일 규모

의 자국산 석탄간접액화 파일럿 공장 등 3기를 2008년까지 가동 예정이고, 8,000-12,000배럴/일 규모의 간접액화 공장의 엔지니어링 설계를 2010년까지 완료를 목표로 추진하고 있다<sup>[9]</sup>.

##### 4-2. 미국<sup>[6]</sup>

현재 7개 주에서 8개의 CTL 프로젝트가 추진중이다 (표 9). 대부분 합성석유와 전기를 같이 생산하는 간접액화방식을 채택하고 있다. 애리조나 주에서는 Headwaters사와 Hopi Tribe간의 MOU 체결하여 1만배럴/일의 액화유와 전기를 생산하는 계획이 있고, 노스다코타 주에서도 Headwaters사와 Great River Energy사 및 석탄회사간의 MOU 체결하여 1-5만배럴/일의 합성석유와 전기를 생산하려고 한다. 와이오밍 주에서는 DKRW Energy사가 27억 달러를 투입하는 33,000배럴/일 규모의 CTL 사업을 착수하여 2010년 완공을 예정하고 있다. Rentech사는 와이오밍 주와 일리노이 주에서 CTL사업 추진하고 있다. 펜실베이니아 주에서는 WMPI사가 6억 달러 규모로 폐부연탄을 액체연료와 전기로 전환하는 복합공장 실증사업 추진중이다. 이 사업은 DOE CCPI(clean coal power initiative) 실증사업의 일환으로 Shell사 가스화기와 Sasol사의 FT공정 채택하였으며, 정부투자지분은 1억 달러이고 5000배럴/일 규모이다.

##### 4-3. 호주

Anglo Coal사의 자회사인 Monash Energy사가 60,000배럴/일 규모의 석탄액화공장과 조업시 발생하는 CO<sub>2</sub>를 지중에 저장하는 프로젝트를 추진하고 있으며 현재 CO<sub>2</sub> 저장 장소를 선정된 상태이다.

Altona 자원회사는 호주 남부 Arckaringa 지역의 78억톤 아역청탄 개발회사로 자사가 확보한 \$16.5/톤의 저가 석탄을 활용하여 전기와 합성석유를 동시에 생산하는 프로젝트를 추진중이다(3만배럴/일 + 560 MW). 현재 ConocoPhillips사의 가스화기 및 Rentech사의 FT 기술을 적용하여 타당성을 조사하였고 프로젝트의 비용은 약 32억달러로 추정되어 합작사를 찾고 있다.

표 9. 미국 CTL 프로젝트 추진현황.

| 주명 (state)    | 개발업자, 기술사                      | 석탄 종류            | 규모 (bpd)      |
|---------------|--------------------------------|------------------|---------------|
| Arizona       | Hopi Tribe, Headwaters         | Bituminous       | 10,000~50,000 |
| Montana       | 주정부                            | Sub-bit./Lignite | 10,000~50,000 |
| North Dakota  | GRE, NACC, Falkirk, Headwaters | Lignite          | 10,000~50,000 |
| Wyoming       | DKRW Energy                    | Bituminous       | 33,000        |
| Wyoming       | Rentech                        | Sub-bituminous   | 10,000~50,000 |
| Illinois      | Rentech                        | bituminous       | 2,000         |
| Pennsylvania  | WMPI                           | Anthracite       | 5,000         |
| West Virginia | Mingo County                   | Bituminous       | 10,000        |

4-4. 필리핀

필리핀에서는 H&WB사가 직접액화와 간접액화를 같이 연계하는 hybrid CTL공장을 건설하는 프로젝트를 추진중이다. 미국 HTI사가 기술을 공급한다. 61200배럴/일 규모로 프로젝트 비용은 4.2조원, EPC 비용은 2.8조원으로 추정된다. 필리핀 정부, 석탄회사 및 기타 회사들이 참여하고 있다.

4-5. 인도

인도는 석탄이 2900억톤 매장되어 있고, 연간 3억8천만톤을 생산하고 있다. 인도 석탄은 35~50% 회분을 포함하는 저급석탄(3500-5000Kcal/kg)이 대부분이다. 현재 석유를 70% 수입하고 있으므로 석탄액화에 대한 수요가 크다. 자국 내 저급 석탄을 활용하기 위해 Reliance사는 지하가스화(UCG)에 의한 CTL 프로젝트를 착수하였고, Oil India사는 직접액화와 coprocessing의 파일럿 공정을 시험중이다. Coal India사는 carbonization plant를 조업중이며 다른 여러 회사들도 CTL 사업의 가능성을 탐색중이다.

4-6. 뉴질랜드

뉴질랜드에서 가장 큰 석탄회사인 Solid Energy New Zealand사가 6억8천만 달러 규모의 CTL 사업의 타당성 조사를 수행중이다. 자국 내 저급석탄인 Lignite를 원료로 사용하면 유가가 \$35~40/배럴 이상에서 경제성이 있다고 판단하고 있다.

4-7. 인도네시아

자원개발 대기업인 스키코MOK에너지는 수마트라섬 남부에 약 8억 달러를 들여 석탄을 액화연료로 가공하는 석탄액화생산공장을 건설하려 하고 있다. 2011년부터 하루 2만배럴의 석탄액화연료의 생산을 개시하고, 향후 하루 70만배럴까지 생산을 늘릴 예정이다.

4-8. 기타

석유를 수출하고 있는 러시아와 우리와 상황이 비슷한 대만 등에서도 CTL사업의 추진을 검토하고 있다. 일

본의 경우, 자체적으로 개발한 직접액화기술을 중국에 제공할 수 있다는 기사 외에는 특별한 석탄액화 관련 활동이 알려지지 않고 있다.

5. 석탄액화기술 전망

고유가의 지속과 중국에서 새로 건설되는 대형 액화공장의 순조로운 운영 결과는 전 세계적으로 석탄액화공장의 확산을 초래할 것이다. 미국 에너지부(DOE)에서 2030년까지 석유를 대체하는 합성연료의 생산량을 (표 10)과 같이 예측하였다. 유가가 배럴당 60달러선을 유지하면 전 세계적으로 석탄합성석유 공장의 규모가 2030년까지 180만배럴/일이 되고 유가가 배럴당 100달러까지 오르면 CTL 공장이 230만배럴/일까지 건설되어 운전될 것으로 예상하고 있다<sup>10)</sup>. 직접 또는 간접의 어느 경로를 택하더라도 석탄액화공장이 고가이므로 규모의 경제를 적용하여 5만~10만배럴/일 급의 큰 규모 공장이 설치될 것이다. 따라서 유가가 높아지면 5만배럴/일 규모의 CTL 공장이 향후 20여 년간 46개가 건설된다고 볼 수 있다. 액화공장의 건설비는 1배럴/일당 50,000~70,000달러로 예측되나, 최근에 철근 및 인건비 상승으로 100,000달러까지 예측하고 있다. 5만배럴/일 규모의 CTL 공장이 3~5조원 소요되므로, 향후 CTL 시장은 2030년까지 140~230조원으로 추정된다. 현재 CTL 기술을 상업적으로 제공 가능한 회사는 간접액화의 경우 남아프리카공화국의 Sasol사와 직접액화의 경우 미국의 HTI사이다. 기술 수요에 비해 기술공급 능력이 부족한 형편이며, Sasol사의 경우 기술판매는 고려하지 않고 있다. CTL 공장의 경제성은 석탄의 가격 및 초기투자비에 많이 좌우된다. 간접액화의 경우 고열량 석탄 1톤당 2배럴의 합성석유를 제조할 수 있다. 따라서 저가 석탄이 공급되는 경우 유가가 배럴당 40~50달러 이상에서 경제성이 확보된다.

5만배럴/일 규모의 CTL 공장은 연간 약 9백만톤의 역청탄을 소비한다. 따라서 CTL 공장은 저렴한 석탄이 30년간 공장의 수명이 다할 때까지 공급이 가능한 곳에 세워지면 유리하다. 그러므로 초기의 CTL 공장은 대규모

표 10. 미국 DOE의 2030년 합성 연료 생산량 예측(단위 백만 배럴/일, Annual Energy Outlook 2006).

|         |     | 합성 원유    |      |           | 합성 연료 |     | 신재생 연료 |      | 합계   |
|---------|-----|----------|------|-----------|-------|-----|--------|------|------|
|         |     | oil sand | 초중질유 | oil shale | CTL   | GTL | 바이오디젤  | 에탄올  |      |
| 일반적인 유가 | 미국  | -        | -    | -         | 0.8   | -   | 0.02   | 0.7  | 1.5  |
|         | 전세계 | 2.9      | 2.3  | 0.05      | 1.8   | 1.1 | -      | 1.7* | 9.9  |
| 초고유가    | 미국  | -        | -    | 0.4       | 1.7   | 0.2 | 0.03   | 0.9  | 3.2  |
|         | 전세계 | 4.9      | 3.1  | 0.5       | 2.3   | 2.6 | -      | 3.0* | 16.4 |



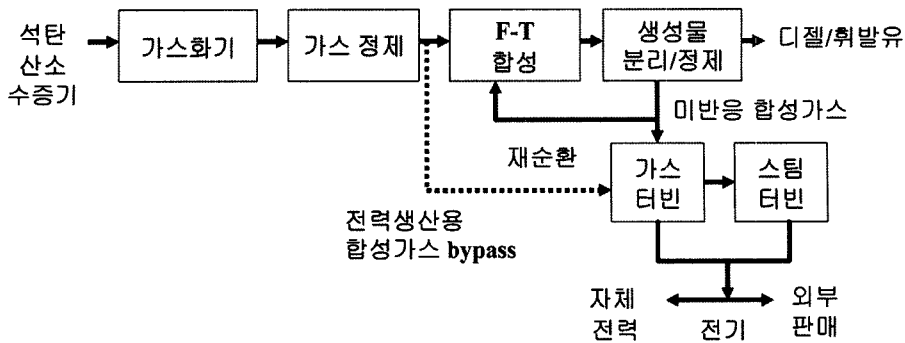


그림 3. 석탄합성석유와 복합발전 복합공장 공정도.

석탄산지에 우선적으로 건설될 것이다.

석탄의 매장량이 적은 국내의 경우에도 액화공장의 운영이 타당성이 있을 것이다. 국내 전기 수요의 일정 부분은 반드시 석탄에 의해 공급되어야 하고, 환경을 고려한 차세대 석탄발전기술은 석탄가스화복합발전(IGCC)이 유력하다. 그림 3에서 알 수 있듯이 석탄간접액화 방식은 합성석유와 전기의 동시생산이 가능하다. 정제된 석탄가스를 이용하여 가스터빈과 스팀터빈에 의해 전기를 생산하는 방식이 석탄가스화복합발전(IGCC)이다. 이 합성석유/전기 동시생산 방식은 효율이 높고, 투자비가 절감되는 장점이 있다. 따라서 석탄가스화발전과 석탄간접액화가 연계된 공장을 정유공장과 인접한 곳에 세우면 국내에서 수입 탄을 사용하여도 경제성 확보가 가능할 것이다. 국내에서 톤당 55달러의 수입석탄을 사용하는 경우 유가가 \$50/배럴 이상에서 경제성이 확보된다고 예측되었다<sup>[11]</sup>. 국산기술에 의하여 석탄가스화, 합성가스 정제, 합성가스 반응 촉매 및 반응기 기술이 개발되어 석탄액화공장이 상용화되면, 국내 CTL 공장 건설에 의해 에너지안보의 확보가 가능하다. 또한 기술공급자가 부족한 상황에서 2030년까지 140-230조원으로 추정되는 CTL 시장의 일부를 우리 자체 기술로 담당할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. [http://www.fischer-tropsch.org/primary\\_documents/presentations/AIChE%202003%20Spring%20](http://www.fischer-tropsch.org/primary_documents/presentations/AIChE%202003%20Spring%20)

National%20Meeting/Presentation%2080a%20Stranges%20Germany.pdf.

2. 영국 dti(Department of Trade and Industry) Technology Status Report 010, "Coal Liquefaction", 1999. (<http://www.dti.gov.uk/energy/coal/cfft/cct/pub/tsr010.pdf>).
3. I. Wender et al, "Chain Growth in Fischer-Tropsch: Cobalt versus Iron", presented at CFFLS Annual Meeting, Roanoke, 2004.
4. Ben Jager, "Fischer-Tropsch Reactors", presented at the AiChE Meeting, March 31, 2003.
5. Yuzhus Zhang, "Shenhua Coal Conversion Technology and Industry Development", presented at the CTLtec 2007, March 14, 2007.
6. [http://www.greencarcongress.com/coalto liquids\\_ctl/](http://www.greencarcongress.com/coalto liquids_ctl/).
7. Dr. Riquarts, "Syngas Island, The Linde Group", presented at the CTLtec 2007, March 14, 2007.
8. Minglin Zhang, "Introduction for Coal Indirect Liquefaction Industrial Demonstration and Market Prospect Analysis for CTL Main Products of Yankuang Group Co., Ltd.", presented at the CTLtec 2007, March 14, 2007.
9. Yong-Wang Li, "Synfuels China and its Development in advanced CTL Process Technologies", presented at the CTLtec 2007, March 14, 2007.
10. Annual Energy Outlook 2006, US DOE.
11. 연구보고서, 정현 외, "석탄가스화 복합발전 사업추진을 위한 기획사업(석탄 합성석유 및 고효율 전기 동시생산)", 2006 산업자원부.