

총 설

직·간접 석탄액화 기술 동향

박주원 · 박철환 · 김학주* · 정 현* · 한 춘†

광운대학교 화학공학과
139-701 서울시 노원구 월계동 447-1
*한국에너지기술연구원 합성석유연구단
305-343 대전시 유성구 가정로 102
(2007년 11월 12일 접수, 2007년 12월 1일 채택)

Trends of Direct/Indirect Coal Liquefaction Technologies

Joo-Won Park, Chulhwan Park, Hak-Joo Kim*, Heon Jung* and Choon Han†

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, 447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea
*Synfeul Research Center, Korea Institute of Energy Research, 102 Gajeong-ro, Yuseoung-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 12 November 2007; accepted 1 December 2007)

요 약

1920년대 독일에서 최초로 시도되어진 석탄액화(coal liquefaction, coal-to-liquid, CTL)는 액화 방법에 따라 직접석탄액화(direct coal liquefaction, DCL)와 간접석탄액화(indirect coal liquefaction, ICL)로 나누어진다. 석탄액화 기술은 1970년대부터 2000년대까지 다양한 연구개발을 통해 원유를 대체할 수 있는 자원으로 개발되고 최적화 되어왔다. 특히 최근에는 국제유가의 상승 및 원유수급의 불안정으로 인해 안정적이고 매장량이 풍부한 석탄에 대한 관심이 더욱 높아지고 있으며 여러 국가에서 석탄액화 프로젝트가 진행 중에 있다. 본고의 취지는 석탄액화기술의 기술개발 현황 및 동향을 검토하는데 있다. 따라서 직·간접 석탄액화공정 비교와 함께 각국의 석탄액화 사업 현황 및 동향을 소개하였다. 석탄액화 사업은 대규모의 국책사업으로 추진되어야 하며 정부의 지원하에 해외 선진기술습득의 길을 모색하여야 할 것이다.

Abstract – Coal liquefaction technology was established in Germany in 1920s. Coal liquefaction refers to the process in which coal is converted into liquid fuels such as gasoline and diesel oil under certain conditions. Coal liquefaction is usually classified into direct coal liquefaction (DCL) and indirect coal liquefaction (ICL). Various technologies for coal liquefaction, conducted between 1970s and 2000s, resulted in the development and optimization of a communication ready technology for the production of petroleum substitutes as refinery feedstocks. The purpose of this paper is to review the research, development and demonstration of coal liquefaction. In these respects, various DCL and ICL processes under development were illustrated and compared. Also, the status and perspective of coal liquefaction projects in the world were viewed. Considering the scale, and technical difficulties of domestic coal liquefaction, the project has been led by the government.

Key words: Coal to Liquid, Liquefaction, Direct Coal Liquefaction, Indirect Coal Liquefaction

1. 서 론

두 차례에 걸친 석유파동은 세계 에너지문제의 심각성을 일깨워 주었으며 대체에너지개발을 촉진시키는 계기가 되었다. 또한 1990년대 초의 걸프전쟁 및 2000년대의 아프간 전쟁과 이라크 사태 등은 세계 각국들로 하여금 석유자원의 무기화에 따른 대처방안 수립의 심각성을 다시금 일깨워 주는 계기가 되었다. 현재 세계 각국은 자국의 에너지확보에 주력하고 있으며 우리나라도 현재와 같이 국제 원유시장이 불안한 상황에서 국내의 해외 에너지 의존도는 날로

높아가고 있음을 감안할 때 세계 어느 나라보다도 대체 에너지 개발은 시급한 과제이다.

석유의 대체자원으로서의 석탄은 매장량이 풍부하고 전 세계에 걸쳐 비교적 균일하게 분포되어 있어 수급 및 가격이 안정적[1]이므로 석유자원이 전혀 없는 우리나라의 경우 석탄을 인조원유로 전환시키기 위한 석탄액화 기술은 장차 상당한 중요성을 지닐 것으로 예상된다.

석탄액화공정은 석유자원이 전혀 없는 독일에서 1920년대 최초로 개발되어 2차 세계대전 중 독일에서 12개의 석탄액화공장이 가동되어 독일내 비행기유의 98%와 전체 탄화수소제품 원료의 47%를 공급하였으나 종전과 더불어 대부분의 연구 및 생산 활동이 거

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: chan@kw.ac.kr

의 중단 되었다. 특히 1950년대 초 중동의 유전발견 후 석유개발이 계속되면서 종전 후 미국정부에 의해 간신히 명맥을 이어오던 석탄액화공정의 상업화 연구는 석유에 비해 높은 석탄액화유의 생산원가 때문에 긴 휴면상태로 돌입하게 되었다.

그러나 1960년대에 들어서 석탄액화반응기구가 규명되기 시작하면서 보다 경제적이고 완화된 반응조건하에서 석탄액화유의 제조가 가능해 졌으며, 두 차례에 걸친 석유파동 이후 그 관심이 한층 높아져 여러 국가에서 자국만의 석탄액화공정을 연구, 개발하게 되었다.

남아프리카공화국은 1955년에 자국의 고회분 저급석탄을 이용한 석탄간접액화 플랜트인 Sasol 1을 Sasolburg에 건설하였다. 이는 세계최초의 석탄액화 상용화 공장이며 그 후 1980년과 1982년에 Sasol 1을 개량한 Sasol 2, 3을 추가로 건설하여 현재 남아프리카공화국의 수송연료 수요의 27%를 생산하고 있다.

또한 미국 일본 등의 선진국들은 자국의 특성에 맞는 석탄액화공정을 개발하여 파일럿 플랜트의 시험가동을 완료하고 국내 및 세계 여러 곳에서 석탄액화 상용화공장 설립에 박차를 가하고 있다. 중국도 2002년 중국 최대 석탄회사인 Shenhua Group Corp.이 수송연료 생산을 목적으로 내몽골 자치구 Baotou 130 km 남부에 위치한 Majiata에 20,000 배럴/일 규모의 석탄직접액화 공장 건설을 발표하였으며, 2007년 현재 건설이 완료되어 가동을 준비하고 있다. 뿐만 아니라 인도, 뉴질랜드, 호주, 필리핀 등에서도 석탄액화와 관련된 다양한 프로젝트가 준비 중이거나 실행 중에 있다. 이처럼 전 세계가 석탄액화 사업에 혈안인 것은 무엇보다도 석탄이 지구촌 전체 수송 에너지의 90%를 차지하고 있는 석유를 대체할 수 있는 가장 현실적인 대안이기 때문이다.

이러한 세계 각국의 석탄액화프로젝트의 영향으로 국내에서도 석탄액화에 대한 관심이 높아지고 있다. 2007년에 들어서 에너지 전문기업인 케너텍이 인도네시아 석탄액화사업권을 획득했다. 산업자원부와 케너텍은 인도네시아 에너지그룹인 느안사 그룹과 공동으로 직접석탄액화 사업을 추진하기로 하는 양해각서를 체결하였으며, 이 사업은 인도네시아 칼리만탄 지역에서 생산되는 저칼로리 석탄을 석유로 전환하는 대규모 프로젝트다. 양측은 앞으로 1년 동안 사업 타당성을 검토하고 2012년까지 하루 10만 배럴 규모 석유생산 체제를 갖출 계획이며, 이는 연간으로 단순 환산했을 때 생산 규모는 3300만 배럴이며 배럴당 90 달러를 감안하면 연간 29억 달러를 웃돈다.

이에 본고에서는 현재 진행되고 있는 직/간접 석탄액화 공정의 기술개발 현황을 소개하고 최근의 연구개발 동향에 대하여 기술하고자 한다.

2. 석탄액화 공정

2-1. 직접석탄액화공정

석탄직접액화공정은 크게 single-stage 공정과 two-stage 공정의 2종류로 구분할 수 있다. Single-stage 공정은 단일반응기에서 석탄의 열분해와 수소화가 같이 일어나도록 구성되어 있고, two-stage 공정은 2개의 반응기가 직렬로 연결되어, 첫 번째 반응기에서는 석탄이 열분해되고, 두 번째 반응기에서는 수소화가 이루어져 액화유가 생성되도록 구성되어 있다. Table 1은 현재까지 개발되어진 single-stage 공정 및 two-stage 공정을 나타낸 것이다.

주요 공정별 개요는 다음과 같다.

2-1-1. NEDOL 공정

일본은 1920년과 1930년 사이에 South Manchurian Railway 주식회사가 Bergius process를 이용한 석탄 액화에 대하여 기본적인 연구를 시작한 것이 석탄액화에 대한 연구의 시작이었으며, 1935년 bench-scale의 PDU(process development unit) plant의 운영을 시작하였다. 이 연구를 바탕으로 중국의 Wushun 탄광지대에 매년 석유 2만 톤을 생산하는 플랜트가 건설되었고 이 플랜트는 1943년 까지 운전되었다. 그러나 2차 세계대전이후 군사목적으로 사용되었다는 이유로 미국에 의해 일본의 석탄액화 연구는 중지되었고, 1955년에 국가연구소와 대학 등에 의해 석탄액화연구가 다시 시작되었으나, 석탄의 고압수소화 분해법에 의한 석유생산 연구가 아니라 화학물질 생산에 관한 연구이었고 이러한 연구는 1975년까지 계속되었다.

이후 일본은 1974년 제1차 오일쇼크의 막바지에 석유 대체에너지 개발 프로그램의 부분으로 일본의 독자적인 석탄액화기술개발 프로젝트인 Sunshine 프로젝트를 발족하였다. Sunshine 프로젝트에 의하여 NEDO(new energy development organization, 현재는 new energy and industrial technology development organization)의 주관 하에 크게 역청탄과 갈탄의 액화 효율 상상을 위한 2가지 연구과제가 국가적인 지원 하에 수행되었다.

1978년부터 1983년까지 일본에서는 3개의 회사가 서로 다른 석탄직접 액화공정(direct hydrogenation, solvent extraction, solvolysis liquefaction)을 개발하였으며, NEDO의 주도하에 3개 공정을 조합하여 아역청탄과 저급 역청탄의 전환을 목표로 NEDOL 공정을 개발하였다(Fig. 1). 이 공정의 핵심은 석탄의 액화반응을 위한 단위 공정과 용매의 수소화 처리반응을 위한 단위공정으로 이루어진 two stage process로서 수송연료 제조가 목적이라 할 수 있다. 이 공정의 연구는 0.1 톤/일 규모의 bench unit와 1 톤/일 규모의 PDU와 PSU가 한 공정씩 있으며, 1988년 1 톤/일 규모의 PSU급 석탄액화장치

Table 1. Single & two-stage DCL processes [6]

| Single-stage processes | Two-stage processes |
|---|--|
| -Solvent refined coal process (SRC-I and SRC-II) : Gulf oil | -Consol synthetic fuel (CSF) process |
| -Exxon donor solvent (EDS) process | -Lummus ITSL process |
| -H-coal process : HRI | -Chevron coal liquefaction process (CCLP) |
| -Imhausen high-pressure process | -Kerr-McGee ITSL work |
| -Conoco zinc chloride process | -Mitsubishi solvolysis process |
| -Kohleoel process : Ruhrkohle | -Pyrosol process saarbergwerke |
| -NEDO process | -Catalytic two-stage liquefaction process : DOE and HRI(HTI) |
| | -Liquid solvent extraction (LSE) process |
| | -Brown coal liquefaction (BCL) process : NEDO |
| | -Amoco CC-TSL process |
| | -Supercritical gas extraction (SGE) process |

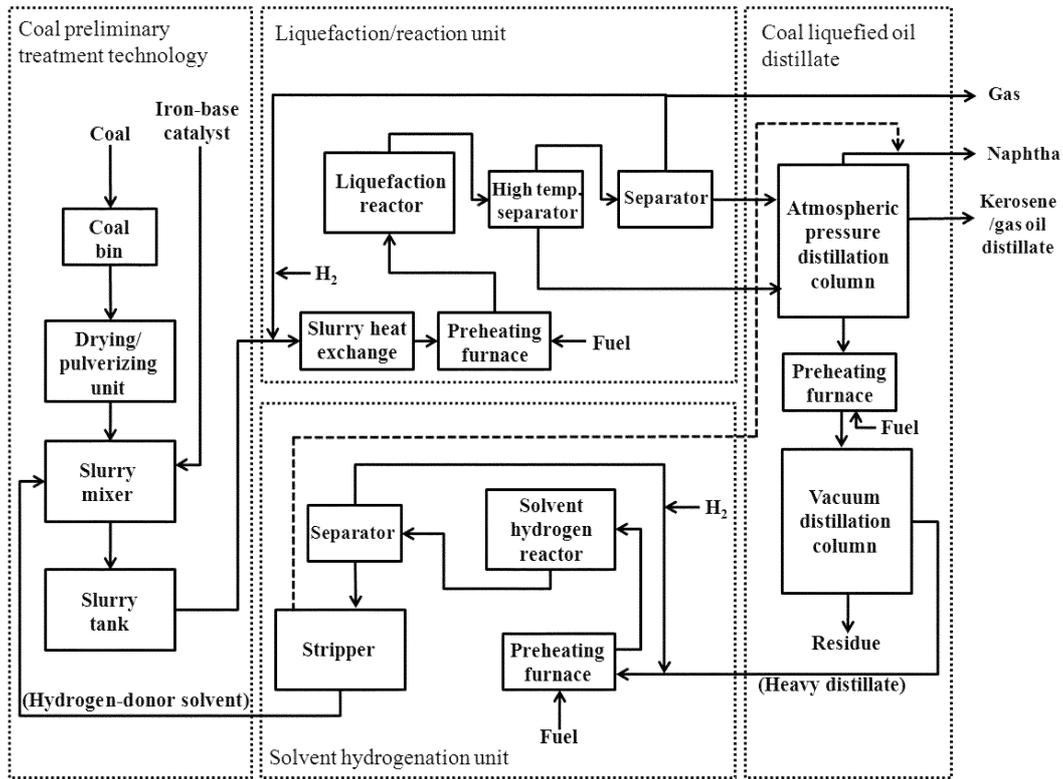


Fig. 1. NEDOL process flow chart [10].

를 건설하여 운전하였고, 150 톤/일 규모의 파일럿 장치를 1996년 Kashima에 건설하고 6,200시간 동안 시운전하였다. 이때 액화유의 수율은 58%였다.

NEDOL 공정에서는 석탄가루가 2~4%의 합성 철촉매와 함께 재순환된 액화유에 슬러리화 되어 150~200 기압, 435~465 °C로 유지된 반응기에 수소와 함께 주입된다. 슬러리의 반응기 체류시간은 1시간이다. 용매 수소화 처리 반응 단위공정은 반응온도가 320~400 °C이며, 반응압력은 100~150 기압, gas/solvent 비율이 28(scf/lb), 반응시간은 60분이며 Ni/Mo 촉매가 사용된다. 반응기 출구물질은 식혀서 상압 증류탑에서 경질유를 분리하고 탑저제품은 감압 증류탑으로 보내진다. 감압 증류탑에서 분리된 중질유의 일부는 수소화 반응기에서 수소가 첨가되어 석탄액화용매로 재순환되며 감압증류 탑저제품은 수소제조 용도로 사용된다. NEDOL 공정의 액화유는 다른 공정 액화유에 비해 저급이어서 강도 높은 upgrading을 필요로 한다.

2-1-2. H-Coal 공정

본 공정은 1964년부터 Hydrocarbon Research Inc.(HRI사, 현 HTI사)에서 개발된 액화방법으로 직접 촉매를 사용하는 대표적 방식이다. 본 공정은 1970년대에 이어 1980년대에 들어서 하루생산 200톤의 대규모 시험가동을 거친, 상용화가 가능한 방법이다. 본 공정은 최종 원하는 연료 종류에 따라 fuel-oil mode 또는 syncrude mode로 조업가능하며 공정도는 Fig. 2에 나타나 있다.

건조된 미분탄은 순환유와 혼합되어 200 기압으로 투입되어 수소와 혼합된다. 이 혼합물은 370 °C로 가열되어 ebullated-bed catalytic reactor로 하부에서 주입된다. 반응기내에서는 촉매가 유동층상태로 부유하면서 석탄액화를 진행시킨다. 이때 촉매는 약간씩 투입 및 배출하면서 반응기 내에서 활성도를 유지시킨다. 반응온도는 450 °C

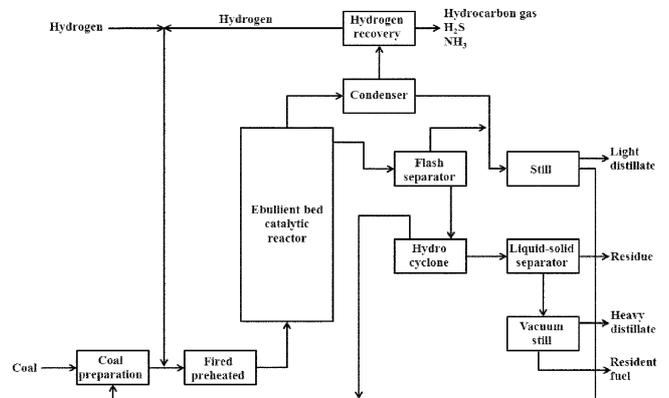


Fig. 2. H-coal process flow chart [11].

를 유지하며, 반응기내에 튜브를 설치하여 반응물을 순환시킨다. 반응기에서 배출되는 증기는 냉각되어 액화 분리한다. 또한 생성가스는 scrubber를 통해 탄화수소, 암모니아, 황화수소 등을 제거한 후 수소는 순환시킨다. 반응기 하부에서 배출되는 슬러리는 상압으로 감압되어 증류 분리한다. 증류는 상압 및 진공의 두 공정을 거쳐 세 부 분류된다.

본 공정도 가장 큰 문제점은 고액분리이다. 본 공정에서는 hydrocyclone에 의해 순환액으로부터 약 60%의 고체분리가 가능하다. 또한 syncrude mode에서는 진공 증류시 여분의 고체물질 제거가 가능하지만 fuel-oil mode에서는 그 분기가 어려운 단점이 있다.

2-1-3. BCL(brown coal liquefaction) 공정

BCL(brown coal liquefaction) 공정은 호주에 있는 수분함량이 높

은 Victoria 석탄을 액화시키기 위하여 일본-호주 상호 연구개발 계획의 일환으로 호주의 Victoria, Mornsell에 50 톤/일 규모의 공정을 건설하여 1987년부터 1990년 10월 까지 가동 완료하였으며 실제 연속 안정 가동 시간은 1,726시간이었다. 이 공정은 2단 수소화 공정으로서 각단 사이에 탈화장치(deasher)가 설치되어 있다. 우선 첫 번째 반응기는 철 성분의 함유량이 높은 슬러리 촉매를 사용하며, 두 번째 반응기에서는 Ca-Ni-Mo 촉매가 충전된 고정층 반응기가 이용된다.

첫째단의 반응압력은 150~200 기압, 반응온도는 427~448 °C이고 대상 석탄의 수분함량(60% 이상)이 높기 때문에 특수한 탈수 건조 시스템이 필요하다. 두 번째단의 반응압력은 첫 번째단과 같으며 반응온도는 첫단보다 낮은 360~400 °C이다. 생성액화유 수율은 약 50%(daf 석탄기준)의 경중(中)간 증류유가 된다. 또한 파일럿 테스트가 종료 후에도 0.1 톤/일 규모의 벤치급 장치를 이용한 연구가 계속 수행되어 파일럿에 비해 24% 이상의 효율 증가 가능성을 확인하였다.

2-1-4. CTSL(catalytic two stage liquefaction) 공정

이미 개발된 H-Coal 공정은 고온(440~450 °C) 촉매 공정으로서, 과도한 열분해에 의한 다량의 탄화수소기체 생성과 수소소모량이 높다는 단점이 있다. 고온이 되면 액화 및 경질화 반응에는 유리하지만 수소공여 용매를 만드는데 있어서는 바람직하지 못하다. 따라서 분해반응과 수소화 반응 속도를 조절하고, 용매의 수소공여 능력을 증진시키기 위하여 2단 공정이 개발되었다고 볼 수 있다.

1982년도에 HRI에서 촉매 이단 공정 개념을 최초로 도입하였다(Fig. 3). 이 공정은 첫 번째 반응기의 온도를 400 °C 정도로 낮춰서 수소화 및 분해반응 속도의 균형을 피하고 재순환 용매가 반응 도중에 직접 수소화됨으로써 자유기로서의 수소 전달속도를 용이하게 하고, 두 번째 반응기는 수소화 분해반응 속도를 증가시키고, 방향족 용매를 생산하기 위하여 1단 반응기 온도보다 높은 온도인 435~440 °C에서 운용하게 된다. 참고로 2단 반응에서 생성된 방향족 용매는 1단 반응기에서 수소화 된다. 이렇게 첫단 반응온도를 낮춤으로써 수소 소모량 효율을 증가시킬 수 있고 기존 H-Coal 공정에 비해 약 50% 정도의 탄화수소 기체 생성량 감소를 가져오게 되었다.

한편 2단 촉매 공정을 거친 액화 생성물은 두 번의 촉매 수소화에 의하여 경질·고급화가 가능하게 되었고, 또한 탈화 장치로 도

입되는 잔사도 기존의 여과장치로도 고-액 분리가 가능하게 되었다.

공정효율 개선, 즉, 액상 증류유의 수율을 높이기 위해서는 회재와 함께 배출되는 잔사의 양을 감소시켜야 하며 결국 잔사를 증류유로 전환시키는 것이 필요하게 된다.

기존의 1단 촉매 액화 공정인 H-Coal 공정은 American Cyanamid 1442B인 Co-Mo/-Al₂O₃ 촉매를 사용했으며 이 촉매는 석유잔사를 수소화 분해시키기 위하여 기존에 개발된 것이다. 반응 측면에서 보면 석유에서는 열분해가 먼저 일어나고 열분해 생성물의 촉매 수소화에 의한 반응 순서로 되지만, 석탄 액화에 있어서는 수소화 반응이 우선 일어난 후 방향족 수소화합물이 분해된다는 점이 상이한 것으로 알려져 있다. 결국 방향족 분자의 수소화 능력이 잔사의 분해 속도를 좌우하게 된다. 그런데 기존의 H-Coal 공정에 사용된 촉매는 작은 분자의 분해를 위하여 평균 기공 크기 분포가 60~70Å 인 담체로 만들어져 있기 때문에 석탄 액화를 위해서는 적합하지 않다는 것이다. 따라서 수소화 효율을 증진시키기 위하여 Co에 비해 수소화 반응에 활성이 더 높은 Ni 조촉매로 대체하고 평균 기공 크기 분포도 115~125 Å으로 변형시키게 되었다. 이상의 개선에 의해서 CTSL 공정에 있어서 증류유의 수율이 약 76%(역청탄의 경우)로 상당히 높아졌으며 수소 이용 효율은 10 lb distillate/lb H₂ 이상이 되었다. 이외에도 액화유의 성분에 있어서도, 비균일 원자의 함량이 낮은 반면에 H/C 비가 높고, 액화유의 특성이 석유의 성질과 유사하다는 특성을 갖게 되었다.

그런데 1985년 이후 Wilsonville에서 운용하고 있는 CTSL 공정은 HRI에서 운용하는 온도와 달리 첫단은 약 430 °C, 둘째 단은 약 420 °C로 운용하고 있다. 다른 반응조건은 HRI-CTSL과 거의 같으며 공정 수율도 거의 같다고 보고되었다. 이 공정의 중요 설계개념은 첫단은 열분해 반응이 주반응이고 두 번째 단에 있어서는 용매의 수소화를 주반응으로 보는 견해이다.

CTSL 공정은 기존의 직접석탄액화 공정에 비해 조업조건외의 완화와 더불어 연속식 공정 운용이 용이하며 특히 증류유의 수율, 질 및 액화 전환율이 상대적으로 높고 S, O, N과 같은 비균일원자의 함량도 낮은 가장 진보된 공정이라고 할 수 있다.

CTSL 공정의 단위공정은 크게 slurry mixing, 직접액화 반응 공정, separation 및 upgrading 공정으로 나눌 수 있다. 이중 직접액화 반응 공정은 석탄을 용해시켜서 일차 액화 생성물을 생성하기 위한 분해 반응(dissolution)과 증류 및 분리가 가능하도록 만들기 위한 일차 액화, 생성물의 경질-고급화 반응(upgrading)의 2 단계 과정에 의해서 진행된다. 분해 반응은 열 혹은 촉매의 작용에 의하여 쇠상의 탄화수소, 산소 혹은 유황을 함유하는 약성 결합 등이 절단되어서 다양한 분자량 크기의 자유기 및 carbonium 이온이 생성되며, 이들이 수소화(hydrogenation), 수소 재배치(rearrangement), 그리고 자체 재결합 등에 의하여 일차적으로 안정화 되는 과정이라 할 수 있다. 이때 적절한 수소 공급원에 의하여 안정화 되었을 경우에는 액체 및 기체 생성물로 전환되지만 수소 공급이 원활하지 못할 때는 자체 결합에 의하여 코우크와 같은 분해되기 어려운 고분자 물질을 형성하게 된다.

2-2. 간접석탄액화공정

석탄의 간접액화란 석탄을 우선 가스화시켜 CO와 H₂로 이루어진 합성가스로 변환시킨 뒤 촉매하에서 반응시켜 탄화수소를 합성하는 방법이다. 대표적인 공정은 탄화수소를 생산하는 Fischer-

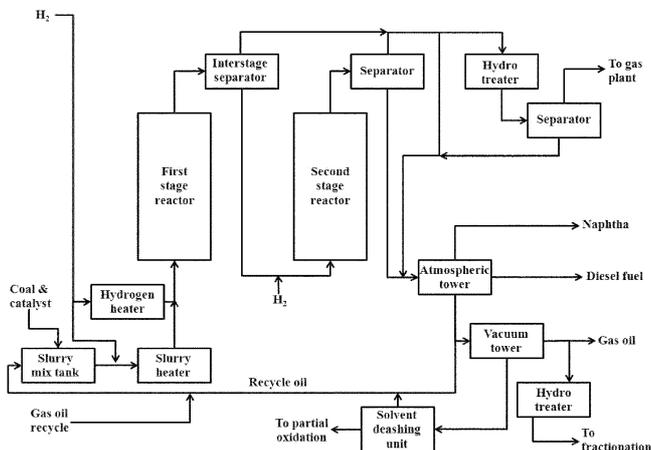


Fig. 3. CTSL process flow chart [12].

Table 2. ICL processes [6]

| ICL processes |
|--|
| Sasol process |
| Rentech process |
| Syntroleum process |
| Mobil methanol to gasoline (MTG) process |
| Mobil methanol to olefins (MTO) process |
| Shell middle distillate synthesis (SMOS) |

Tropsch(F-T) 공정으로 2차세계대전 중 독일에서 상업적 규모의 공장을 가동하였고, 현재 가동중인 남아프리카공화국의 Sasol 공장이 있고, Mobil사의 메탄올로부터 가솔린을 합성하는 MTG(methanol-to-gasoline) 공정이 있다. Table 2는 현재까지 개발된 간접석탄액화 공정을 나타낸 것이다.

이 공정들의 장점은 초기 석탄구조가 완전히 분해되고 초기 석탄 내의 금속성분이 완전히 분리되어서 매우 낮은 유황분과 회분을 가진 깨끗한 연료를 얻을 수 있다는 점이다. 그러나 초기 석탄구조를 완전히 분해시키는 많은 과정과 화학적 변화가 일어나는 공정이므로 전체 열효율은 좋지 않다.

실제 공정에서는 H₂와 CO를 함유한 중열량 가스를 원료물질로 사용한다. 그러므로 전체공정 중에 석탄의 가스화 반응기가 포함되어서 Sasol 공정에서는 Lurgi 가스화 반응기가 사용되고 있다. 이러한 액화반응기의 설계에 있어서 중요한 인자는 액화촉매의 선택과 반응중에 생성되는 많은 열을 제거하는 방법이다. 촉매의 피독이 큰 문제이므로 합성가스를 잘 정제하여서 공급하여야 한다. 여기서 정제된 가스의 조성을 $[H_2/(2CO+3CO_2)]=1.03$ 로 조절하여 반응기에 공급한다.

간접석탄액화의 장점은 촉매의 조성, H₂/CO의 비 및 조업조건을 적절히 조절하면 LPG, 가솔린, 등유, 디젤유, 연료유 등의 여러 종류의 산물을 생성할 수 있다는 점이다. 또한 촉매의 종류에 따라 메탄올과 아세톤 등도 생산할 수 있다. 대표적으로 사용되는 촉매는 Fe, Co, Ni, Ru, ZnO₂ 및 ThO₂ 등이다.

2-2-1. MTG(methanol-to-gasoline) 공정

Mobil사의 MTG 공정은 석탄으로부터 메탄올을 합성한 후 이를 제올라이트 촉매 하에서 가솔린으로 전환하는 공정이다. 이 공정의 주요 개발은 ZSM-5라 불리는 제올라이트 촉매에 있다. 제올라이트는 alumina-silicate 결정으로 촉매의 기공구조를 만들어 원하는 크기 범위 내의 탄화수소분자를 선택적으로 반응시킨다. 즉 ZSM-5 촉매는 C₅~C₁₀의 중간크기의 분자는 내보내고 C₁₀ 보다 큰 분자는 나가지 못하게 하는 역할을 한다.

이 선택도에 의하여 메탄올을 고급 휘발유 규격의 옥탄가와 비등점을 갖는 탄화수소 혼합물을 합성하는 것이다. 전체 공정은 석탄의 가스화, 메탄올 합성 및 메탄올로부터의 가솔린 전환으로 크게 구분된다.

MTG 공정에서는 가스로서 생성된 합성가스를 50~100 기압으로 가압하여 재순환되는 가스와 혼합 가열하여 고정층 반응기 상부에 주입한다. 이때 반응기 온도는 250~270 °C로 조절하고 반응기 하부에서 나가는 메탄올 증기는 열교환기에서 원료주입가스를 예열시킨다. 여기서 배출되는 배출물은 메탄올 분리기로 주입되어 고압에서 분리된다. 메탄올 속에 용해되어있는 가스들은 팽창기에서 압력을 감소시켜 제거한다. 메탄올의 가솔린으로의 전환반응은



로 표시할 수 있다. 이 반응은 매우 큰 발열반응이고 이 발열을 제거하는 것이 설계의 주요 인자가 된다. 이를 위해 Mobil사는 MTG 공정에 적합한 고정층 반응기와 유동층 반응기를 개발하였다. 고정층 반응기에서는 반응열 조절을 두 단계 반응을 통해서 수행한다. 첫째 단계에서는 dimethylether(DME)를 형성하여 20%의 열을 방출한다. 이때 생성물은 DME, 물 및 메탄올이 평형 혼합물을 이루고 있다. 반응로의 주입온도는 300 °C 정도이고 출구온도는 410 °C이며 조업압력은 23 기압이다. 두 번째 단계는 탄화수소의 전환반응으로 반응로 입구온도 330 °C, 출구온도 400 °C에서 22 기압의 압력하에서 반응된다. 대략 50,000 배럴/일의 연료유를 생산하는데는 DME 반응기 2개와 5개의 메탄올-가솔린 반응기가 필요하다. 그 반면 유동층 반응기를 사용하는 경우는 반응기 하나로 400 °C, 40 기압의 조업조건에서 같은 양을 생산할 수 있다.

MTG 공정은 뉴질랜드의 Maui 천연가스를 원료로 12,500 배럴/일 규모의 상용 공장으로 건설되어 조업하였으나, 현재는 경제성의 문제로 1단계의 메탄올 제조공장만 운전되고 있다.

2-2-2. Sasol 공정

Sasol은 1950년 남아공정부가 국영 석탄·석유·가스공사(South Africa Coal, Oil and Gas Corporation)를 설립하여 1979년 민영화되었으며 현재 정부지분은 10% 이내로 머무르고 있다. 전 세계 15 개국에 생산시설과 판매망을 보유하고 있는 에너지 및 화학회사인 Sasol은 자국의 석탄을 액화 시킬 목적으로 개발된 F-T 공정을 지난 50여 년간 사용해 오고 있다.

F-T 반응에 의한 남아프리카의 Sasol 공정은 1955년에 가동되어서 석탄으로부터 자동차연료, 액체 부산물 및 산업용 연료가스를 생산하고 있다. 1955년에 Sasolburg에 처음 지어진 Sasol 1은 6,000 배럴/일의 규모이고 저온공정(LIFT; low temperature F-T)이다. Sasol 1은 Lurgi 가스화 반응기를 사용하여 107 m³/일의 원료가스를 만들어 850 톤/일의 액체연료와 19 Mj/m³의 중열량가스(1.7×10⁶ m³/일)를 생산하고 있다. 이 공정은 고정층 반응기와 철촉매를 사용하며 반응온도는 200~250 °C, 압력은 20~30 기압이다. 1980년과 1982년에 Secunda에 세워진 Sasol 2와 Sasol 3은 총 50,000 배럴/일 생산규모로 자동차연료와 석유화학원료를 생산하고 있다. Sasol 1과 Sasol 2 및 Sasol 3의 차이점은 Sasol 2 및 Sasol 3공정은 고온공정(HTFT; high temperature F-T)이며 순환유동층 반응기와 차세대 반응기인 SAS(sasol advanced synthol) 7개를 첨가하여 주로 가솔린 생산을 목적으로 개발된 것이다. Fig. 4는 Sasol 공정도를 나타낸 것이다.

Synthol 순환 유동층에는 원료가스와 순환가스를 혼합시켜서 160~200 °C에 F-T 반응과 가스 전환반응이 수행된다. 반응에서 나오는 열은 내부의 냉각관에 물을 통과시켜서 증기를 생성하여서 그 일부는 주입 가스의 예열에 활용한다. 반응기를 나오는 반응물질, 생산물 및 촉매는 촉매 hopper에 들어가서 cyclones에서 기체와 입자가 분리되며 여기서 배출되는 기체는 세척하고 냉각시켜서 탄화수소 산물을 얻는다.

Sasol에서는 천연가스로부터 제조된 합성가스 전용으로 코발트 촉매를 적용한 슬러리 반응기와 수소화 처리공정이 조합된 SSPD(sasol slurry phase distillate)공정도 최근에 개발하였다. SSPD 공정에서 만들어진 파라핀은 옥탄가는 낮으나, 에틸렌 등을 제조하기 위

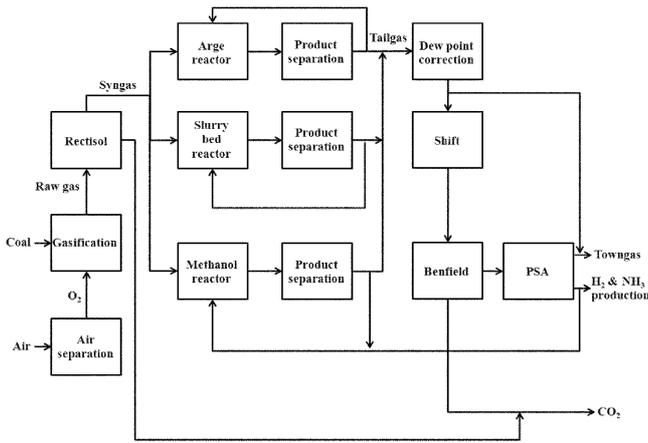


Fig. 4. Sasol process flow chart [16].

한 cracking 용도로는 매우 좋다. 현재 Sasolburg에 2,500 배럴/일 규모의 테코 장치가 설치되어 운전되고 있다.

Sasol 공정은 크게 석탄가스화, 가스정제 및 간접액화 공정으로 구성된다. 석탄가스화 공정은 석탄을 고온/고압의 조건에서 ‘수증기+산소’ 혹은 ‘수증기+공기’와 접촉시켜 불완전 연소 및 가스화반응시켜 CO와 H₂가 주성분인 합성가스를 생성하는 것이다. 이때 소량의 산소와 반응한 석탄은 부분산화가 되고 수증기와 반응한 석탄은 수성가스화 되어 CO와 H₂가 생성된다. 이렇게 제조된 합성가스는 가스정제 공정을 거쳐 가스내의 불순물을 제거한 후 F-T 반응을 통해 액체연료를 합성된다. 액화효율은 직접액화에 비하여 낮으나 생산물의 품질이 우수하고 환경적으로 우수하다는 장점이 있다. F-T 기술의 핵심은 성능이 향상된 촉매기술과 반응기술이며, 액화 공정의 운전 조건에 따라 반응생성물이 달라지고, 촉매 및 반응기의 종류도 변하게 된다. 저온 공정에서는 중유 및 왁스 등 분자량이 큰 탄화수소가 많이 생성되고, 고온 공정에서는 휘발류 및 디젤등이 많이 생성된다[7].

2-3. 직간접 석탄액화 공정 비교

석탄의 직접 및 간접액화는 각각의 장단점을 가지고 있으며, 각 공정들도 그 형태나 조업 방식등 많은 차이가 있다. 이러한 각 공정들 간 차이를 알아보기 위하여, 이상에서 알아본 직간접액화공정 산물 비교를 Table 3에 나타내었고, 석탄액화 주요 공정의 비교를 Table 4

Table 3. Product comparison of DCL and ICL processes

| | DCL | | ICL | |
|---------------------------|--|---|--------------|-----------|
| Product Mix | | | | |
| 1) Diesel | 65% | | 82% | |
| 2) Naphtha | 35% | | 18% | |
| Diesel | | | | |
| 1) Cetane | 42~47 | | 70~75 | |
| 2) Sulfur | < 5 ppm | | < 1 ppm | |
| 3) Aromatics | 4.8 wt% | | < 4 wt% | |
| Naphtha | | | | |
| 1) Octane | 100 | | 45~75 | |
| 2) Sulfur | < 0.5 ppm | | nil | |
| 3) Aromatics | 5 wt% | | 2 wt% | |
| Thermal efficiency (%) | 60~70 | | F-T methanol | DME |
| | | | 55 | 58.3 55.1 |
| Price of crude oil (\$/B) | | | | |
| Upper limit | 40.4 | 40 | 32.5 | 37.6 |
| Lower limit | 33 | 22 | 25.3 | 29.5 |
| Merits & defects | - high-octane gasoline - low-cetane diesel - using low grade coal - high thermal efficiency | - low-octane gasoline - high-cetane diesel - high quality products - low liquefaction efficiency (when using low grade coal) | | |

에 도시하였다. Table 3에서와 같이 투입된 석탄과 유틸리티의 합에 대한 최종제품의 열량비율로 정의되는 석탄액화공정의 열효율은 직접석탄액화공정(60~70%)이 간접액화공정인 F-T 공정(55%), 메탄올 합성공정(58.3%) 및 DME 합성공정(55.1%)보다 높은 것으로 나타났다. 간접액화의 경우 저급탄에 대한 액화효율이 낮은 반면, 직접액화는 저급탄을 선호한다. 또한 직접액화의 에너지 효율은 높게 나타나지만 직접액화의 경우 생성물내의 방향족 화합물의 양이 간접액화보다 많아 생성물의 upgrading 비용이 추가로 발생한다. 또한 직접액화에는 잠재적인 수자원, 공기 방출 및 환경적인 문제를 가지고 있다.

생성물의 경우, 직접석탄액화는 고옥탄가의 휘발유와 고밀도 (BTU/gallon)의 생성물을 생산하는 장점이 있으며, 간접석탄액화는 생성물의 품질이 직접액화보다 양호하다는 장점이 있다. 직접액화 상용공장의 경우 높은 장치비로 인하여 생산된 직접액화유의 해당 원유가는 40.4 \$/배럴이고 이중에서 장치비가 69%를 차지한다. 공

Table 4. Comparison of coal liquefaction processes

| Process | Single stage DCL | | Two stage DCL | | ICL |
|----------------|--------------------------|---|-------------------------------------|---|-----------------------------------|
| | NEDOL | H-Coal | BCL | CTSL | Sasol |
| Company | NEDO (JAN) | HRI (HTI) (USA) | NEDO (JAN) | HTI (USA) | Sasol (ZAF) |
| Year | 1978~1983, 1996, 6,200 h | 1980 | 1987~1990 | 2003~ | 1955~ |
| Scale | 1T/D, 150T/D | 200T/D | 50T/D | 1,000,000 T/yr | 50,000B/D |
| R&D step | PSU pilot | Pilot | Pilot bench (AUS) | Commercial plant | Commercial plant |
| Reactor/cata. | 2~4% Fe cata. | Co-Mo/Al ₂ O ₃ , Ni-Mo/Al ₂ O ₃ | Fe slurry cata., Ca-Ni-Mo | 2-stage ebullated reactor, Ni-Mo/Al ₂ O ₃ | SAS fixed bed reactor |
| Temp./press. | 435~465 °C, 150~200 atm | 435~465 °C, 200 atm | 427~448 °C, 360~400 °C, 150~200 atm | 400 °C, 435~440 °C, 170 atm | 200~250 °C, 300~350 °C, 20~30 atm |
| Yield | 58% | 50% | 50% | 60~65% | 55% |
| Characteristic | need upgrading | reload catalyst during reaction | using brown coal (moisture 60%) | the first DCL plant | the first commercial CTL plant |

간속도를 늘리고 액화유의 수율을 증가시켜서 장치의 크기를 줄이고, 촉매회수 및 수소제조 효율화를 통해 직접액화유의 해당 원유가를 33 \$/배럴까지 낮출 수 있다고 전망하고 있다.

독립형 F-T 공정의 간접석탄액화 공장의 경우 간접액화유의 가격이 40 \$/배럴로 예측되며, 지속적인 연구개발로 32 \$/배럴까지 내려갈 수 있다고 전망된다. 또한 정유공장 및 IGCC 발전소에 근접한 장소에 F-T 공장을 건설하여 시설 및 물질을 공유하면 액화유의 가격을 22~27 \$/배럴로 줄일 수 있다.

또한 Table 4에 도시한 것과 같이 같은 직접 혹은 간접 액화 공정이라 할지라도 개발 국가의 실정 등을 고려하여 공정이 개발되어 많은 차이를 보인다. 일본의 BCL 공정의 경우 갈탄의 액화가 목적으로 개발되어 철성분 슬러리 촉매, Ca-Ni-Mo 로 구성된 촉매를 사용하는 반면, 미국의 CTSL 공정의 경우 2-stage ebullated 반응기와 Ni-Mo/Al₂O₃ 촉매를 사용한다.

3. 국내외 석탄액화 프로젝트 현황 및 전망

3-1. 국외 현황

3-1-1. 미국

미국은 1970년 후반부터 1980년대 초반의 오일쇼크기간동안 수십억불의 석탄 직접액화 프로젝트를 진행하면서 여러 석탄직접액화 공정에 대한 기반연구와 상용연구를 실시하였다. 그러나 1980년대 이후로 원유가격이 안정되면서 석탄직접액화에 대한 상업화 계획이 연기되었으며, single-stage 공정에 비하여 효율이 우수한 two-stage 공정이 새로이 개발되었다.

Two-stage 공정은 각 반응 단계를 최적화시키기 위한 공정이며, 결국 보다 더 완전한 반응 조건하에서 고품질의 증류유, 낮은 탄화수소 기체 생성물에 따른 수소 이용효율을 높일 수 있게 되었다. 액화유의 품질면에서도 잔사찌꺼기, 공해물질인 비균일원자의 함량이 낮고, H/C 비는 기존 타공정에 비하여 상대적으로 높은 특성을 갖게 되었다. 따라서 이 액화유는 기존 공정에서 생산된 액화유에 비하여 보다 더 낮은 반응온도 및 압력하에서 쉽게 정제가능하고 촉매의 비활성도 및 수소 소모량이 상대적으로 낮다는 장점을 지니게 되었다.

미국은 알려진 곳만 7개 주에서 석탄액화 사업을 벌이고 있다[6]. 주로 대규모 탄전지대가 있는 주들이 나서고 있다. 와이오밍 주는 DKRW 에너지사가 오는 2010년 하루 3만 배럴 규모의 인조석유를 생산할 계획으로 27억 달러 규모의 프로젝트를 진행 중이다. 애리조나 주는 Headwater사와 Hopi Tribe사 간의 협력 MOU 체결을 통해 하루 1만 배럴 가량의 인조 석유를 생산할 방침이다. 또한 노스 다코타주 역시 Headwater사와 Great River 에너지사 및 석탄회사등 3자가 MOU를 체결, 하루 1만~5만 배럴 규모를 생산하는 사업을 진행 중이며 오하이오 주는 Baad 에너지사가 Shell 사의 가스화 및 액화공정을 이용, 하루 3만 5,000 배럴 규모의 생산 공장 건설을 추진하고 있다.

이밖에 미국은 세계 석탄매장량의 11%를 보유한 것으로 알려진 몬태나 주와 미시시피 주, 펜실베이니아 주 등에서 각각 석탄액화 사업을 추진하는 등 동시다발적으로 석탄액화공장 건설을 진행하고 있다. 펜실베이니아 주립대의 프랭크 클레멘테 교수는 미국의 석탄액화와 관련 “석탄액화는 수송용 에너지 확보의 유일한 대안”이라면서 미전역에서 석탄액화에 나설 경우 하루 2,500만 배럴의 원유

를 확보할 수 있을 것이라고 발표하기도 했다.

또한 미 공군은 최근 석탄에서 추출한 액화석유로 B-52기를 운행하는 실험을 성공적으로 마쳤다고 보고하였으며, 미 국방부는 2016년까지 전투기 등의 운항에 필요한 연료의 절반을 액화석유등 대체에너지로 충당할 계획이다. 미 국방부의 이 같은 계획은 석유를 무기로 사용하려는 중동국가들의 정치적 압력이나 테러 및 전쟁 등의 이유로 중동산 석유수입이 끊길 수 있고, 자연재해나 테러에 의해 미국 내의 정유시설이 파괴될 수 있다고 판단하여 수입이 많은 석유의존도를 줄여 안정적인 운항을 가능토록 하기 위해서다.

3-1-2. 일본

중국이 석유의 대체에너지원으로 석탄액화를 선택함에 따라 일본의 NEDO도 국제적 협력 프로그램의 한 부분으로 중국 석탄의 액화테스트, 액화촉매 개발 및 인적자본 육성을 위해 1982년에 0.1 톤/일 규모의 석탄액화설비를 중국에 설치하였다. 1997년 이후에는 Heilongjiang 지역의 Yila 석탄을 사용하는 액화플랜트의 실행가능성 조사를 중국으로부터 요청받아 수행하였으며, 내몽고지역의 매장된 2,000억 톤 가량의 석탄에 대한 액화사업 가능성평가 조사를 위탁받았다.

또한 1992년에 인도네시아 정부로부터 인도네시아 갈탄의 액화협동 연구를 부탁받았다. 이에 NEDO는 인도네시아 기술평가 응용국(assessment and application of technology of indonesia, BPPT)과 인도네시아 갈탄을 이용한 상용석탄액화플랜트 설립을 목적으로 새로운 석탄액화연구를 시작하였다.

일본은 1974년 sunshine project 발족 이후 석탄액화분야의 기술개발을 계속 진행해 왔으며, 그 결과 현재 중국 및 인도네시아 등의 국가들과 함께 상용화 석탄액화플랜트 개발에 박차를 가하고 있다.

3-1-3. 중국

중국은 2007년까지 석탄 직접액화에 의한 생산규모를 연간 1백만 톤으로 계획하고 있고, 2013년까지 중국 전체 원유수입량의 10%를 석탄액화유로 대체코자 하고 있다.

2002년 중국 최대 석탄회사인 Shenhua Group Corp.이 내몽골 자치구 Baotou 130 km 남부에 위치한 Majiata에 석탄 직접액화 공장을 짓기로 발표한 이후 현재 건설이 완료 되었으며 2007년 하반기에 운전을 시작할 예정이다. 1단계 석탄직접액화 프로젝트에는 총 20억 불이 소요되고, 정부는행인 Bank of China에서 자금을 지원하고 독일의 ABB Lummus Global이 전체 프로젝트 관리를 수주하여 진행하고 있다. 2단계 프로젝트는 정부 승인단계에 있다고 알려져 있고 3개의 석탄직접 액화공장을 더 건설할 계획이다.

직접액화 프로젝트의 기술은 미국과 일본의 기술들이 결합하여 미국 DOE에서 개발된 직접액화 방식이고 미국 유타주 소재 HTI사에서 기술 라이선스와 공정설계, 3개의 액화반응기(2단 슬러리 phase)로 구성된 반응기 기술이 제공된다.

Shenhua사는 HTI 기술의 15% 지분도 매입하여, 기술의 안정적인 지원과 향후 개발될 기술의 소유에 대한 대비도 한 상태이다. 반응조건은 2,500 psig(170 기압), 427 °C이고 HTI사의 GelCat 촉매(분산 나노크기인 철 기반 촉매)를 사용한다. 하루에 13,000 톤의 석탄을 사용하여 최종적으로는 하루 5만 배럴의 저유황 디젤과 휘발유를 생산할 예정이다. 이 프로젝트에서 중요한 한 부분은, 1단계에서는 설비의 60%를 중국산으로 하고 2단계에서는 중국 국산화율을

80%로 예상하고 있다는 점이다.

또 다른 석탄액화 프로젝트는 중국 남서부 지역인 Yunnan 지구에서 1995년부터 시작되었으며, 총 12.5억 불을 투입하여 연간 510만 톤(일일 14,000 톤)의 석탄을 사용하여 88.3만 톤의 디젤 및 휘발유와 67,500 톤의 LPG를 생산 할 계획이다. 이 프로젝트에서 9.5년의 자금 회수기간을 예상하고 있다.

석탄액화에 대한 중국의 기술개발 내용을 살펴보면, Helongjiang 지구의 Yilan에 파일럿급 직접액화 플랜트를 1995년부터 운영중이다. 또한, Shenhua 그룹은 2004년 상하이 Huayuan 그룹, 상하이 전기 그룹과 공동으로 석탄액화 센터를 상하이에 1,200만 불을 투자 설립하여 중국에서 건설중인 석탄액화 공장의 기술지원과 운전원 훈련을 목적으로 운영하고 있다. 중국은 석탄액화를 통한 합성연료유 생산만이 아니라 최근 일본 기술을 도입하여 석탄과 천연가스로부터 DME를 생산하고 있다.

3-1-4. 호주

호주는 에너지 전문회사인 Linc사가 땅속에서 석탄을 가스화하는 기술과 석탄액화 기술을 조합, 하루 1만 7,000 배럴 규모의 석탄액화유를 생산하는 기술을 추진하고 있다.

또한 Anglo Coal사의 자회사인 Monash Energy사는 60,000 배럴/일 규모의 석탄액화공장 건설을 추진하고 있으며, Altona 자원회사도 자사가 보유한 저가의 석탄을 활용한 석탄액화 플랜트 건설 프로젝트를 추진중이다.

3-1-5. 뉴질랜드

뉴질랜드는 자국에서 가장 큰 석탄회사인 솔리드 에너지 뉴질랜드사가 6억 8,000만 달러를 투입하여 석탄액화사업과 관련된 타당성 조사를 수행중이다. 뉴질랜드는 자국내 저급 석탄을 활용한다는 방침이다.

3-1-6. 필리핀

미국 HTI사가 필리핀 에너지성을 위하여 필리핀 남동부 지역에 석탄액화 hub 를 구축하는 기술적 경제적 분석을 수행중이다. 마닐라 타임스가 2005년 9월 발표한 바에 따르면 이 프로젝트는 총 28억 불이 투자되어 하루 6만 배럴의 합성연료유를 생산할 수 있는 다목적의 플랜트 건설이 가능하고 전기도 같이 생산하는 다목적의 플랜트를 구상하고 있다. 합성연료유 생산량은 필리핀의 전체 운송유류량의 15%를 담당하고 연간 32억 불의 유류비용 절감효과가 있

다고 HTI사의 모회사인 Headwaters사에서 2005년 발표하였고, HTI사는 필리핀 H&WB사와 기술제공 협약을 체결하려고 하고 있다고 보도하고 있다. 또한 같은 보도에서 필리핀 에너지차관은 약 2억 불 석탄직접액화 프로젝트는 하루 1만 톤의 석탄을 사용하여 6만 배럴의 합성연료유를 생산할 수 있을 것으로 발표하였다.

3-1-7. 인도

HTI사는 필리핀과 마찬가지로 인도의 아삼지역 석탄을 사용하여 상용급 석탄액화 플랜트 건설의 타당성을 Oil India Limited를 통해 수행중이다. 아삼지역 석탄은 HTI사 석탄분석에 의하면 지금까지 시험한 석탄중 가장 반응성이 좋은 석탄이었고 이에 따라 석탄액화의 경제성도 우수할 것으로 예상되어 진다고 보고되었다.

Table 5는 현재 국외에서 진행중인 석탄액화 프로젝트를 비교한 것이다.

3-2. 국내 현황

1960년대에 들어서 석탄의 액화반응기구가 규명되기 시작하면서 보다 경제적이고 완화된 반응조건하에서 석탄액화유의 제조가 가능해졌으며, 두 차례에 걸친 석유파동 이후 석탄액화에 대한 관심이 높아졌다. 국내에서도 1990년대에 한국에너지기술연구원을 중심으로 석탄직접액화분야기술개발에 대한 연구가 진행되었으며, 광운대학교의 석탄과 페타이어 및 페플라스틱의 공동직접액화연구에 관한 연구가 수행되었다. 그러나 상용플랜트의 수만 barrel per day(bpd)에 비하면 국내 반응기 규모는 1 bpd 이하의 규모이다.

이와 같이 국내의 석탄직접액화 기술은 미미한 실정이며 단기간에 독자적인 석탄직접액화 기술을 보유할 수 없다는 점을 고려하여 turn key 방식의 석탄직접액화 프로젝트가 도입되어야 할 것이다. 현재 상용화 되어 있는 석탄액화 공정의 산업공급 기술의 비교를 Table 6에 나타내었다.

최근 중국의 세계최초의 석탄직접액화 상용화 플랜트건설의 영향으로 국내에서도 석탄직접액화 플랜트에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 영향으로 2007년에 들어서 에너지 전문기업인 케너텍이 인도네시아 석탄액화사업권을 획득했다. 이 사업이 본격화하면 연간 3,300만 배럴 규모의 인조석유를 추출할 수 있게 돼 우리나라 에너지 자원 확보에 새로운 장이 열릴 전망이다. 산업자원부와 케너텍은 인도네시아 에너지그룹인 느안사그룹과 공동으로 직접석탄액화사업을 추진하기로 하는 MOU를 체결하였다. 이 사업은 인도네시아 칼리만탄 지역에서 생산되는 저칼로리 석탄을 석유로 전환하

Table 5. Status of CTL projects in foreign countries [6]

| Country | Owner/Developer | Capacity (bpd) | Status |
|--------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|
| South Africa | Sasol | 150,000 | Operational |
| China | Shenhua | 20,000 (initially) | Construction Operational in 2007~2008 |
| China | Lu'an Group | 3,000~4,000 | Construction |
| China | Yankuang | 40,000 (initially), 180,000 planned | Construction |
| China | Sasol JV (2 studies) | 80,000 (each plant) | Planning |
| China | Shell/Shenhua | 70,000~80,000 | Planning |
| China | Headwater/UK Race Investment | Two 700-bpd demo plants | Planning |
| Indonesia | Pertamina/Accelon | ~76,000 | Construction |
| Australia | Anglo America/Shell | 60,000 | Planning |
| Australia | Altona Resources pla, Jacobs Consultancy, Mine Consult | 45,000 | Planning |
| Philippines | Headwater | 50,000 | Planning |
| New Zealand | L&M Group | 50,000 | Planning |

Table 6. Technical supply of CTL industries

| Company | Process type (capacity) | Characteristic |
|----------------------|--|---|
| Sasol (South Africa) | ICL (150,000 BPD) | - Joint ownership by joint investment is desired. - Condition for business participation is complicated (ex, government support). |
| Shell (Netherlands) | ICL (15,000 BPD) | - No technology sale according to business policy - GTL technology based on natural gas is possessed. |
| Rentech (USA) | ICL (235 BPD pilot) | - Pilot plant (scale of 200 BPD) was constructed. - Technology sale is possible, but it is too expensive |
| HTI (USA) | DCL (20,000 BPD under construction in China) | - Facility (scale of one million ton) for direct liquefaction is in construction. - Project for construction of CTL facility is under way in Philippines |

는 대규모 프로젝트다. 양측은 앞으로 1년 동안 사업타당성을 검토하고 2012년까지 하루 10만 배럴 규모 석유생산 체제를 갖출 계획이며, 이는 연간으로 단순 환산했을 때 생산 규모는 3,300만 배럴이며 배럴당 90 달러를 감안하면 연간 29억 달러를 웃돈다. 양측은 이를 위해 1단계로 2011년까지 12억 달러를 투자하고, 2012년까지 모두 55억 달러를 투입할 예정이다.

이에 앞서 양측은 동부 칼리만탄 지역에 석탄수송용 철도(350 km)와 물류터미널 등 인프라스트럭처 건설을 위한 MOU를 체결했다. 이 MOU에는 포스코건설, 케너텍, 느안사그룹 등 사업주체는 물론 동부 칼리만탄 주정부와 인도네시아 철도공사 측 대표도 공동으로 참여하기로 서명하였으며, 이 건설 사업은 2009년까지 모두 13억 달러가 소요되며, 케너텍은 건설대가로 이 지역 석탄개발사업권을 얻었다.

3-3. 국내 석탄액화 전망 및 대책

우리나라는 하루에 약 24만 배럴의 원유를 수입하여 사용한다(연간 8억 9천만 배럴). 2006년 수송 연료로는 하루에 72만 배럴이 휘발유, 경유 및 제트유로 사용되고 있다(연간 약 2억 6천만 배럴).

우리나라는 최소한 하루에 30만 배럴(연간 약 1억 1천만 배럴, 국내 수요의 15%)의 합성 석유를 확보해야 외부의 석유 공급 부족이나, 초 고유가에 대응할 수 있을 것이다. 즉, 수송 연료의 절반에 해당하는 연료를 국내에서 제조하면 석유 수입이 전면 중단되어도 공공교통수단과 군사 용도의 수송연료는 최소한 확보 될 것이다. 또한 석탄 합성 석유는 배럴당 50달러 이하로 제조가 가능하므로 상당한 무역 수지 적자(유가가 60 달러/배럴이면 매년 1조 1천억 원)를 줄일 수 있다. 석탄 합성 석유 1일 30만 배럴 공장의 국내 건설 시장은 15조 원으로 예측 된다.

국내에서는 1960년대 서울대학교 화공과에서 F-T법에 관한 연구를 수행한 적이 있으며, 2차에 거친 석유과동을 겪고 난 후 석유자원의 전량을 수입하는 상태에서 에너지수급을 위한 대체방법을 모색하게 되었다. 따라서 대체에너지개발방안의 일환으로 석탄액화연구의 필요성을 인식하게 되었으며, 1986년에서 1995년까지 한국에너지기술연구원을 중심으로 석탄직접액화에 대한 타당성 및 실용화 개발에 관한 연구가 이루어졌다. 특히 정부에서는 1987년 대체에너지개발촉진법을 제정, 국내에너지 소비량의 3%를 대체에너지로 충당한다는 장기목표를 수립하고 이를 위하여 1988년부터 대체에너지개발연구를 범국가적으로 지원하고 있다. 이러한 지원의 일환으로 석탄액화연구가 한국에너지기술연구원, 광운대학교 등에서 행하여져 왔다.

현재까지 국내에서 액화연구는 매우 초보적 단계로 실험실적 batch test 정도 규모에서 기초연구가 주로 수행되어 왔다[18]. 이러

한 상태에서 우선 선진기술습득은 물론, 우선 외국 유연탄을 사용하여 액화기술 향상을 도모해야 할 것이다. 이에 따라 pilot plant 건설 및 시험가동이 이루어진 후 충분한 기술과 함께 국내 무연탄 액화의 길을 모색하여야 할 것이다.

미국을 비롯한 선진국에서는 석탄액화기술개발이 이미 완료되어 대규모 시험조업도 완료된 상태이며 현재, 중국 등에 대규모 석탄 직접액화 플랜트를 건설하고 가동을 앞두고 있다. 특히 최근 중동 사태에 따른 유가상승은 빠른 석탄액화의 실용화를 예고하고 있다. 석탄액화는 현재 가장 실용화가 유력시되는 대체에너지의 하나로서 원료구득이 용이하며, 기존 연료시설의 개선이 어렵지 않고 그 양이 풍부하다.

그러나 국내에는 이에 대한 기술이 매우 취약하여 이제 기초연구 단계를 벗어나지 못하고 있다. 특히 석유를 전적으로 수입에 의존하는 상태에서 대체에너지개발의 일환으로 석탄액화연구에 대한 지원이 이루어지고 있으나 미약하다. 따라서 국내 에너지의 안정적 공급 및 지속적 경제발전을 도모하기 위하여 석탄액화기술개발은 필수적이므로 빠른 기술개발 및 선진기술습득과 함께 pilot plant 건설에 의한 시험가동이 요구된다.

현재 가장 편리하게 사용되는 에너지인 석유의 수급불안정, 높은 가격, 유한성 등을 감안시 실용적 대체에너지의 출현은 필수적이다. 그동안 세계적으로 여러 종류의 대체에너지가 개발되어 왔으나 아직까지 가장 접근이 쉽고, 저렴하고, 매장량이 풍부한 자원은 석탄이라 할 수 있다. 그동안 석탄연소에 따른 환경오염, 지구온난화 등으로 그 사용도가 낮아왔으나 선진기술의 석탄액화로 이러한 문제는 해결가능하게 되었다. 또한 석탄액화유의 높은 가격이 실용화에 부담을 두어왔으나 지속적인 높은 원유가는 이제 직접액화유 생산을 가능하게 한다.

4. 결 론

국내 에너지원의 97%를 수입하고 있는 현재 상태에서 원유가 상승의 불안은 국내경제에 큰 영향을 주어왔다. 이미 겪어왔듯이 국제원유가의 등락에 따라 원자재가격과 함께 소비물가도 변화폭이 크다. 따라서 원유가가 국내 경제 및 산업에 미치는 영향은 지대하다고 할 수 있다. 그러나 석탄액화에 의해 액화유가 신에너지로서 기능을 발휘할 때, 국내 원유 의존도는 낮아질 수 있으며 그만큼 경제 및 산업은 안정화 될 수 있다. 특히, 석탄은 광범위한 분포, 막대한 매장량, 낮은 가격등과 함께 수급의 용이성이 있으며 가격변화가 크지 않다. 또한 간접액화기술개발과 함께 국내 무연탄 활용가능 시 국가 경제에 미치는 효과는 매우 커질 것이다.

석탄액화는 국가 신에너지 범위에 포함되어있으며 국가에서도 정

책적 지원이 가능한 분야이다. 이제까지 화석에너지인 석탄에 대하여 CO₂ 등 유해가스 배출 에너지원으로 일반시민에게 인식되어왔으나, 기술개발로 인하여 이러한 유해물질 제거가 가능하여 청정에너지로서 자리를 잡아가고 있다.

한편 석탄액화기술은 공공성이 매우 크며 단위의 핵심기술의 범용성도 높다. 액화기술의 정립은 추후 국내의 시설 수주를 유발할 수 있으며, 고온 고압반응, 고액분리, 기체정제 및 분리기술 등은 타 화공 관련 산업에 광범위하게 적용가능하다. 그러나 현재까지 국내에서 액화연구는 매우 초보적 단계로 실험실적 batch test 정도 규모에서 기초연구가 주로 수행되어 왔으며 이러한 상태에서 우선 선진기술습득은 물론, 우선 외국 유연탄을 사용하여 액화기술 향상을 도모해야 할 것이다. 이에 따라 pilot plant 건설 및 시험가동이 이루어진 후 충분한 기술과 함께 국내 무연탄 액화의 길을 모색하여야 할 것이다. 석탄액화는 아직 미숙한 국내기술로서 대규모 상용화에 진입하기에는 너무 큰 모험성이 요구되므로 국가 정책에 의한 정부의 적극추진과 함께 정부투자가 우선 필요하다. 정부의 정책 및 투자지원은 우선 1차 시설도입과 함께 선진 핵심기술 습득과 직결되는 중요한 일이다.

감 사

본 논문은 한국에너지기술연구원의 연구비지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. U.S. DOE, Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 2007 with Projections to 2030," (2007)(<http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/coal.html>).
2. Ruberto, R. G. and Cronauer, D. C., "Effect of Solvent Extraction Sequence on the Apparent Distribution of Coal Liquid Products," *Fuel Proc. Tech.*, 2(3), 215-219(1979).
3. Kleinpeter, J. A., in *Coal Liquefaction Products*, vol. 1, Wiley, New York(1983).
4. <http://www.princeton.edu/~jarigoni/CHEMGOOD/Synfuels.htm>
5. Gray, A., "Inherent Mineral Matter in Coal and Its Effect Upon Hydrogenation," *Feul*, 57(4), 213-216(1978).
6. Miller, C. L., "Coal Conversion - Pathway to Alternate Fuels," 2007 EIA Energy Outlook Modeling and Data Conference, Washington, DC, U.S. DOE(2007).
7. Wendeer, I., "Chain Growth in Fischer-Tropsch: Cobalt versus Iron," presented at CFFLS Annual Meeting, Roanoke(2004).
8. Movi, K., Taniuchi, M., Kawashima, A. and Takahashi, T., "Coal Liquefaction Fundamentals," ACS CSJ Chem. Congress, 75, Sep., 1014(1979).
9. Specks, R., "Progress in the Field of Hydrogenation and Gasification in the Federal Republic of Germany," The Eighth International Conference on Coal Research, Tokyo, Japan, Oct, 16-20 (1988).
10. Japan, New Energy and Industrial Technology Development Organization, "Clean Coal Technologies in Japan," (<http://www.nedo.go.jp/sekitan/cct/>).
11. Schindler, H. D., "Coal Liquefaction. A Research Needs Assessment Technical Background," DOE/Er-0400, vol. II(1989).
12. Comolli, A. G., "Direct Liquefaction Proof of Concept Program," Hydrocarbon Technologies inc.(1996).
13. http://www.carlist.com/autonews/2006/autonews_307.html.
14. Mochida, I., Otani, K. and Korai, Y., "Efficiency of Hydrogen Transferring Liquefaction of a Subbituminous Coal Using Hydrogenated Fluoranthene for Short Contact Time at High Temperature and Low Pressure," *Feul*, 64(7), 906(1985).
15. Schindler, H. D., Chen, J. M. and Potts, J. D., "Intergrated Two Stage Liquefaction," Final Technical Report DOE Contract DEAC22-79ET14804, June(1983).
16. Steynberg, A., "Overview of Sasol CTL Technologies & Recent Activities," The Montana Symposium Energy Future of the West (2005). (<http://energyfuture.mt.gov/presentations/Claude%20Corkadel%20-%20MT%20Symposium%2010-18-05.pdf>).
17. Coal Research Establishment, Annual Report, p. 281(1987/1988).
18. Jeong, D. H., Kim, S. R., Lee, J. Y., Jeong, T. J. and Han, C., "Synergistic Effects and Mechanism of Coal/Polypropylene Coliquefaction," *J. Korea Ind. Eng. Chem.*, 9(5), 742-748(1998).