



기계기술분야

소재기술분야

화학기술분야

석유화학산업기술

생명·바이오기술분야

에디터 | 임경희 전문위원 | 최성원 · 강계홍

- 1 기술개관 - 석유화학산업의 기술과 전망 임경희
- 2 세일가스와 가스화학기술 전기원
- 3 석탄의 석유화학 원료대체 기술과 동향 윤용승
- 4 On-Purpose Propylene 제조기술 동향 이윤조
- 5 정유산업의 동향 및 최신 유망기술 김철현

석탄의 석유화학 원료대체 기술과 동향

윤용승 | 고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부장

3

1 개요

한국과 같이 에너지 부존자원이 없고 해외로부터 수입에 전적으로 의존해야 하는 환경에서 에너지원 다변화는 정부와 민간에서 일관되게 추진되어 온 정책이다. 석유화학업계도 저렴한 원료(석탄, Pet Coke, 세일가스, 바이오매스 등)로 다변화가 일상화되는 상황에 직면하고 있다. 석탄은 석유나 천연가스 대비 가격과 공급이 그래도 저가이면서 안정적이고 최근추세인 고효율과 CO₂ 저감까지 가능해지면 아마도 향후 100년 이상은 전기생산과 화학물질 원료로 유용하게 사용될 것이다. 현재 석탄은 전기를 만드는 데 가장 많이 사용되고 있는데, 단순히 연소시켜 스팀열원으로 사용하는 형태로서 석탄가격이 저렴하기에 가능하다. 사실, 오래전부터 석탄을 이렇게 단순하게 활용하기에는 범지구적으로 아까운 자원이라는 의견이 있었지만 사회적 경제성과 효율성 측면에서 묻혀왔다. 석탄을 석유화학 원료로서 갖고 있는 성분 모두를 고부가가치 화학원료로 변환해서 활용하는 방식이 궁극적으로는 더 자연친화적이다.

최근 원유가격은 미국 세일가스, 세일가스 생산 때 동반되는 세일석유 생산량 확대 및 원유수요 감소로 배럴당 80달러에서 70달러대로 내려가는 추세에 있다. 세일에너지가 얼마나 지속가능한가에 대해서 의문을 제기하는 경우도 있지만 수십년 유지에는 문제가 없어 보인다. 유가가 낮아짐에 따라 석탄가격도 크게 낮아져 중국의 경우에는 내몽골 등 산지석탄을 이용한 석유화학산업이 확대중에 있다. 중국 상하이 인근에서도 내몽골로부터 운하와 바다를 통해 공급되는 많은 양의 석탄에서 석유화학 원료물질을 저렴하게 생산하고 있다.

원유가격이 배럴당 50달러 이하까지 내려간다면 굳이 석탄으로부터 석유화학 원료물질을 복잡한 과정을 더 거치면서 만들 이유는 없어진다. 석탄 고체에서 출발해서 폭발성이며 부식성도 있으면서 유독

성인 합성가스를 거치고 복잡한 촉매변환 공정까지 거쳐 석유화학 대체원료 물질을 생산하는 단계가 경제적 타당성을 가지려면 원유가격이 적어도 배럴당 80달러 이상이 되어야 한다. 한국입장에서的问题是 다음과 같다. 중국과 같은 경우는 석유화학 원료물질을 이미 석탄에서 생산하는 산업기반을 확립해가고 있고, 미국은 셰일오일 기반으로 대체시키고 있으며, 중동국가들은 저렴한 자국내 원유로부터 석유화학 물질을 생산하는 경쟁력을 각자 가지고 있다는 데 있다. 한국은 자체기술도 없는 상황에서 저렴한 원료도 없어서 난감한 상황에 처해지고 있다. 어떻게 지금 시점에서 세계적으로 가장 저렴한 에너지/화학산업 원료는 석탄과 미국의 셰일가스인 점은 분명하다.

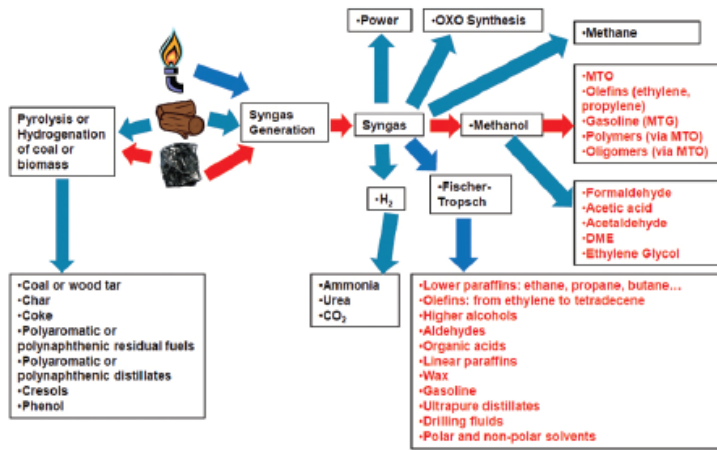
석탄화학산업은 석탄을 원료로 이용하여 화학제품과 청정연료를 생산하는 것으로 C1화학(C1 Chemistry)을 기반으로 한다. 가스화를 통해 얻어진 합성가스를 촉매이용 합성을 하고 분리, 정제과정을 거쳐서 오일, 올레핀, DME(Di-Methyl Ether), 천연합성가스(SNG; Synthetic Natural Gas) 및 MEG(Mono Ethylene Glycol) 등을 생산하는 것이다. 석탄화학산업은 대부분 1조원 이상의 건설비와 3년 이상의 건설기간이 소요되고, 많은 단위공정이 연계됨에 따라 고도의 운전기술이 요구되는 분야이다. 경제성을 확보하기 위해서는 전체 시스템의 안정적인 운전 및 까다로운 생산물 규격을 맞추기도 해야 한다. 대부분 현재의 석유화학산업 상황과 같지만, 원료물질이 액체가 아닌 고체에서 출발하기 때문에 공정이 더 복잡해지는 것이 일반적이다.

석탄 합성가스로부터 석유화학 원료물질을 생산하는 과정은 직접 변환이 가장 이상적이지만 아직 상용기술이 확립되지 못했다. 반면, 메탄올로부터 최종 석유화학 물질을 제조하는 기술은 이미 확립되어 있으므로, 현재는 합성가스에서 메탄올을 만들고 기존 메탄올 변환공정을 사용해서 최종 석유화학 물질을 생산하게 된다. 메탄올은 중요한 C1화학의 기본물질이기도 하고, 메탄올로부터 DME뿐만 아니라 MTO, MTP 제품생산을 하기도 한다.

도 1은 석탄, 바이오매스, 천연가스 등 유기물질을 가스화를 통해서 일산화탄소와 수소가 주성분인 합성가스(Syngas)로 변환시키고, 이를 전기, 옥소화합물, 천연합성가스, 메탄올, 휘셔트롭(Fisher-Tropsch) 합성, 수소로 활용하는 다양한 방법을 보여준다. 모든 유기물질은 가스화(불완전연소+수첨반응 등) 과정을 통해서 합성가스로 변환될 수 있다. 원료 전처리와 반응기로 주입 등이 어려운 고체물질이 가장 비용이 많이 들고 이미 가스상태에서 출발하는 천연가스를 사용하면 가장 저렴하다.

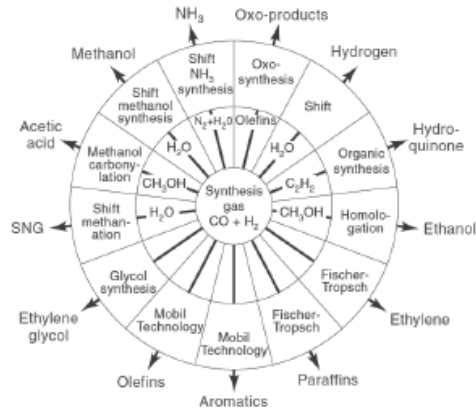
일단 합성가스가 확보되면, 그 다음 과정은 기존 화학산업의 변환과정과 동일하다. 도 2는 어떤 화합물 생산이 가능한지를 요약한 것으로서, 많은 화학원료물질 생산이 가능함을 볼 수 있다. 가스화공정과 각 화학물질 변환공정의 대부분은 이미 상업적 운영이 되는 기술수준에 도달해있고, 원료와 최종제품 가격에 따라 이미 경제성이 있는 경우가 많다. 하지만 아직 개선할 사항들도 많다. 가장 대표적인 부분은 석탄을 가스화해서 화학원료를 생산하는 과정에서 많은 물이 소요되고 CO₂ 발생량이 많다는 점이다. 이 부분에서 아직 기술개발과 성능개선이 필요하고 한국이 나아갈 기술적 방향이기도 하다.

도 1 석탄의 합성가스 변환활용을 통한 석유화학 원료/제품 생산



출처: Selection of an Optimum Gasification Product and Process, Gasification Technologies Conference 2012

도 2 석탄 합성가스를 통한 다양한 화학물질 생산루트



출처: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.

2 합성가스 생산원료와 활용처 현황

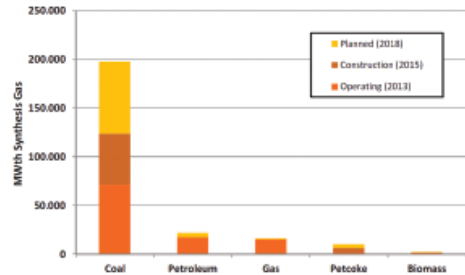
2013년에 전세계에서 생산된 합성가스를 원료별로 구분한 도 3을 보면, 석탄에서 가장 많이 생산되었고 2015년과 2018년 기준 예상치를 보아도 가장 많다. 생산된 총합성가스가 활용된 분야를 보면

[도 4 참조], 화학원료 생산이 가장 높았고 합성연료(주로 납아공에서 생산), 전기생산과 가스이용이 그 뒤를 잇고 있다. 2018년까지 계획도 석탄에서 합성가스를 생산하고 이를 화학원료로 활용하는 양이 가장 많다. 이는 최근 10여년간 활발한 중국의 석탄 합성가스 생산과 활용 프로젝트들이 가져온 결과이다.

세계 10대 합성가스 생산플랜트들을 보면 [표 1 참조], 천연가스에서 합성가스를 생산하는 카타르의 펄 프로젝트(2011년 운전시작)가 가장 규모가 크다. 오래전인 1977년과 1982년에 운전이 시작된 남아공의 사슬 석탄액화 플랜트를 제외하면, 중국의 인쑤안과 유린 석탄액화(CTL; Coal-to-Liquid) 플랜트 2곳, 다방과 신장 SNG 플랜트 2곳, 메탄올 프로젝트는 모두 석탄을 원료로 한다. 최근 인도와 사우디아라비아에서는 정유잔재물을 사용한 대형 전기/화학원료 프로젝트를 진행하고 있다.

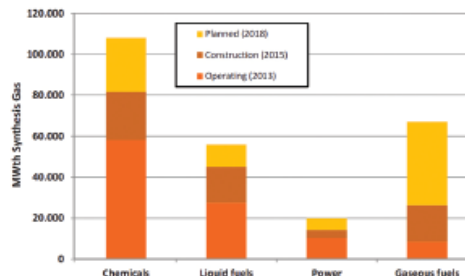
이들 플랜트는 모두가 1조원 이상이 소요되는 대형플랜트 공사로서 해외 전문기술회사와 경험업체들이 과정을 하고 있는 특징이 있다. 석탄가스화를 통한 화학원료 생산기술 자체는 유럽과 미국업체에서 공급받고, 플랜트 제작건설과 운영경험은 중국이 가장 앞서가기 시작한 상태이다. 아쉽게도 한국업체는 원천기술이 없는 상태에다 기술과 경험도 부족하여 이들 해외 프로젝트에 참여를 전혀 못하고 있다.

도 3 2013년도 전세계 합성가스 생산량과 건설 및 계획용량



출처: Chris Higman, State of the Gasification Industry - the Updated Worldwide Gasification Database, Gasification Technologies Conference, 2013.10.16

도 4 생산 합성가스의 최종활용처(2013년)



출처: Chris Higman, State of the Gasification Industry - the Updated Worldwide Gasification Database, Gasification Technologies Conference, 2013.10.16

표 1 세계 10대 합성가스 생산 가스화설비

Plants	Location	Techno-logy	Gasifiers	MWth Syngas	Start year	Feedstocks/ Products
Pearl GTL	Qatar	Shell	18 + 0	10936	2011	Natural Gas / FT Liquids
Yinchuan CTL Plant	China	Siemens	22 + 2	9300	2016*	Coal / FT Liquids
Datang Ningxia SNG Plant	China	SEDIN	45 + 3	7125	2015*	Lignite / SNG
Sasol Syntuels West	South Africa	Lurgi FBDB	40 + 0	7048	1977	Subbit. coal / FT liquids
Sasol Syntuels East	South Africa	Lurgi FBDB	40 + 0	7048	1982	Subbit. coal / FT liquids
CHNG Xinjiang SNG Plant	China	TPRI	7 + 1	6450	2014*	Coal / SNG
Jamnagar Gasification Plant Phase I	India	E-Gas	6 + 2	5000	2015*	Petcoke / Electricity
Jazan IGCC	Saudi Arabia	Shell	16 + 0	4465	2016*	Refinery residue / Electricity
Yankuag Yulin CTL	China	OMB	8 + 0	3733	2015*	Coal / FT Liquids
Yulin Methanol Plant	China	GE	10 + 4	3383	2015*	Coal / Methanol

출처: Chris Higman, State of the Gasification Industry - the Updated Worldwide Gasification Database, Gasification Technologies Conference, 2013.10.16.

3 석탄화학산업

현재의 석탄화학산업은 이전의 석탄 타르에 기반했던 전통적 석탄화학이거보다는 기본적으로 가스화를 통해 생산된 합성가스를 기반으로 한다. 가장 큰 차이는 타르는 시간이 많이 소요되는 열분해에서 주로 얻어지고, 가스화는 대용량화되어 짧은 시간에 반응이 완결된다.

먼저 석탄화학산업의 역사를 간략히 조망해보면 다음과 같다. 18세기에 석탄을 열분해해서 석탄가스를 만들어 가로등 용도 등에 사용했던 초기에는 부산물인 석탄 타르는 버려지다가 유럽에서 타르를 활용하는 기술이 개발됨에 따라 용매, 의약품, 합성섬유, 플라스틱 등 원료로 활용되었다. 제2차 세계대전 때 독일은 석탄을 액화시켜 원유를 대체하기도 하였다. 사실 1950년대 저렴한 석유가 대량생산되기 전까지 화학산업의 기초물질은 석탄에서 얻었는데, 그 상당부분이 열분해할 때 부생되는 타르로부터 얻었다.

석탄화학산업이 가장 활발했던 시기는 1920~1940년 기간이었다. 1930년대에는 석탄을 액화하는 기술이 독일에서 정립되어 액화오일과 화학원료물질을 대량생산하게 되었고, 휘저트롬 촉매공정 개발로 석탄 간접액화가 상용화되었다. 1970년대에는 인종차별정책으로 원유수입이 막힌 남아공에서 석탄간접액화 공장이 대규모로 건설되어 디젤유와 휘발유 및 화학원료물질을 생산하여 지금까지 생산하고 있다. 1970년대 2차에 걸친 석유파동 이후 미국과 일본에서 석탄가스화를 원유대체에 중요한 수단으로 판단하여 대규모 실증규모 기술을 개발하였다. 그러다가 2000년대초 원유가격이 다시 100달러 이상 유지되자 석탄가스화를 통한 석유화학 대체가 다시 부상하였고, 원유소비가 급격히 증가한 중국에서 자국내 풍부한 석탄자원을 사용해서 원유를 대체하자는 정책에 의해 급격한 석탄화학산업 팽창이 이루어졌다.

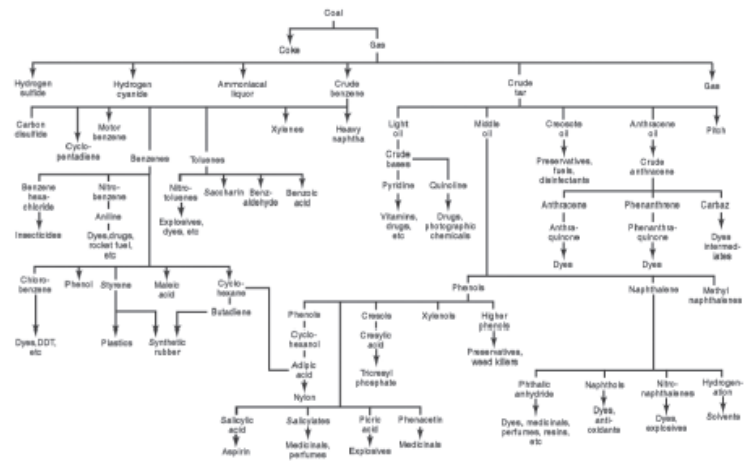
석탄은 구조적으로 원유에 비해 탄소대비 수소함량이 낮다. 따라서 열분해를 통해서 벤젠고리가 많은 석탄의 기반구조는 Char나 코크스로 남기고 최보다 수소함량이 상대적으로 많은 타르 형태를 화학산업의 주원료로 사용하였다. 석탄을 열분해하면 코오크, 석탄타르, 벤젠(석유나프타와 유사한 성분), 암모니아액, 가스가 발생한다. 석탄타르는 주로 중류에 의해 원하는 원료물질로 정제된다. 석탄은 원유에 비해 벤젠고리가 많기 때문에 후단에서 수소 첨가가 요구된다.

제2차 세계대전 때는 많은 철강수요에 의해 제철소용 코크스를 생산하면서 다량의 석탄타르가 부산물로 발생해서 이를 활용한 석탄화학산업이 활발했었다. 지금은 석탄에서 타르를 뽑아 사용하기보다는 유기물질 전체를 합성가스로 변환시켜 화학원료 생산에 사용하는 방식을 택하고 있다. 따라서 반응기 형태도 타르 생산에 유리한 고정층이 아니라 대용량 처리가 가능한 분류층이 선호되고 있다. 또한 원유를 사용하는 석유화학산업과 경쟁하기 위해서는 '규모의 경제'가 요구되어 최소 하루 수천톤의 석탄이 사용되어야 하는데, 이 규모로 하나의 반응기에서 고체원료 처리가 가능한 방식은 아직 분류층밖에 없다. 남아공에서 채용하듯이 고정층 반응기를 수십개 병렬로 운영하는 방식으로 대응이 가능하기는 하다. 1950년대부터 있었던 고정층에 기반한 석탄화학산업의 근간은 1980년대를 거치면서 분류층 방식으로 재편되어 이전기술과는 차원이 다른 첨단 화학산업 기술로 발전하고 있다.

전통적으로 석탄 열분해를 통해서 화학물질을 얻는 루트는 도 4에 나타나 있다. 석탄화학산업에 이용되는 다양한 반응형태가 있는데, 표 2에 비교하였다.

하루 수천톤 처리가 필요하고 복잡한 화학반응기 및 촉매변환이 요구되면서 이쪽에 원천기술과 실적에 강점이 있는 유럽회사들이 시장을 독과점하는 상태가 되었고 이 상태가 지금까지 이어지고 있다. 그

도 5 석탄 열분해를 통한 화학물질 생산루트



출처: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology

표 2 석탄화학산업에 이용되는 주요 반응형태 비교

구분	추출(Extraction)	열분해(Pyrolysis)	직접액화	가스화	연소
주요 생성물	왁스	코크스, 석탄타르, 벤젠 가스	가솔린	합성가스	열, 전기
추가 반응물	-	-	수소	공기/산소, 스팀	공기/산소
반응온도	80~90℃	300~1,300℃	400~480℃	370~1,600℃	1,000~1,800℃
반응 압력	상압	상압	150~700bar	1~60bar	1~30bar
촉매 사용	No	No	Yes	보통 No	No

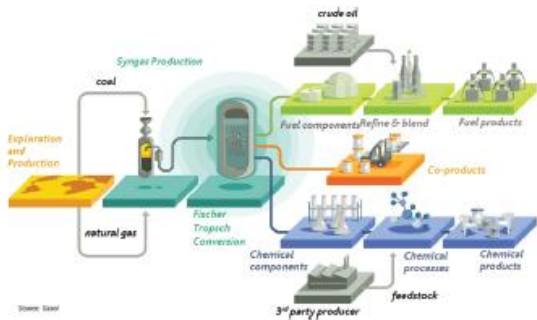
러다가 1990년대 후반부터 중국이 정부차원의 원유를 석유로 대체한다는 강력한 의지로 석탄화학산업이 급격히 확대되었다. 처음에는 유럽기술을 도입하여 건설운영하다가 대부분의 기술을 자체기술화하였고 지금은 새로운 촉매 및 공정기술을 개발 자체산업화하는 초기단계에 있다. 한국이 지금과 같이 수동적인 대응에 머문다면 10여년 이후에는 석탄기반 화학원료 변환공정 기술과 부품의 대부분을 중국에 의존할 개연성이 높다.

4 기술동향

석탄화학산업에서 상업적으로 성공한 사례는 남아공 사솔사, 미국 이스트만화학사, 일본 우베사가 대표적이다. 석탄을 가스화해서 석탄액화유와 화학원료를 생산하는 가장 오래된 공장은 남아공 Sasol사에서 1955년부터 시작되어 현재까지 운영되고 있는 곳이다. 그동안 확장되어 천연가스도 가스화 원료로 사용하고 있고, 남아공에서 소요되는 운송유 30%를 공급하고 있다.

남아공 다음으로 가장 유명한 석탄에서 화학원료물질을 생산하는 사례는 미국 이스트만화학사이다.

도 6 남아공 Sasol사의 석탄/천연가스 사용 간접액화를 통한 화학원료 물질생산 과정

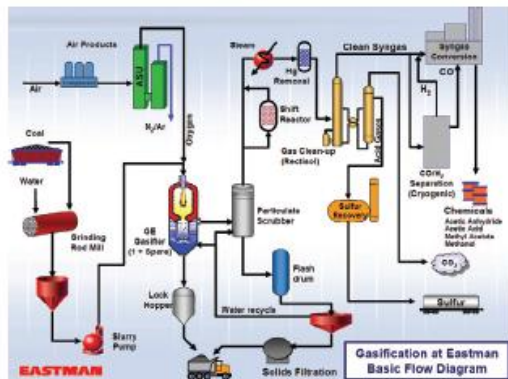


출처: John Sicking, Enabling a Coal to Liquids Industry in the US, 2006 Gasification Technologies Conference

1983년부터 석탄을 물과 섞은 슬러리 형태로 가스화를 통해 Acetic Anhydride를 생산하고 있고, 석탄을 하루 평균 1,300톤을 사용한다.

일본 우베암모니아사가 미국 텍사코 습식 가스화기(지금의 GE가스화기)를 사용해서 1984년부터 하

도 7 미국 Eastman Chemical사의 석탄에서의 화학원료 생산공정도



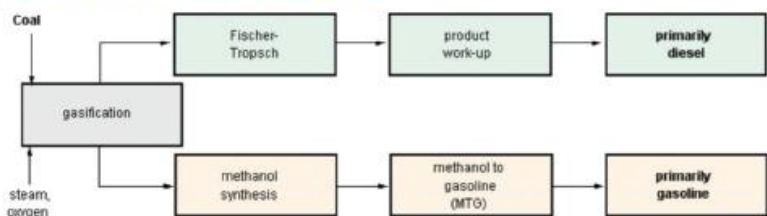
출처: Eastman Gasification Overview, GTC Regulators Workshop, 2005.4.12

루 1천톤 석탄에서 암모니아를 얻고 비료를 생산한 바 있다. 1935~1965년 기간에는 독일 Koppers 고정층 가스화기 300톤/일 설비를 사용해서 비료생산도 했다.

석탄에서 자동차용 연료를 생산하는 대표적인 방식은 휘셔트럼 합성을 통한 디젤유 생산(휘발유 생산도 가능)과 메탄올-가솔린 변환공정(MTG)을 통한 휘발유 생산이다. 중국은 남아공의 석탄 간접액화(Fischer-Tropsch) 공정기술을 도입코자 하였지만 여의치 않자 미국 석탄직접액화기술 보유사 지분을 50% 매입하여 내몽골에 석탄액화공장을 건설운영하고 있다. 중국은 자체 간접액화기술을 확보하고자 여러 대학과 기관에 개발을 맡기고 있다.

중국은 SNG, Olefin, DME 및 CTL 관련연구 개발 및 사업을 실행 석탄화학산업으로 분류하고 집중

도 8 석탄에서 디젤유, 휘발유 생산하는 대표적 방식



육성하고 있다. 중국정부가 적극 지원하는 대규모 실증 프로젝트 연구를 통해 CTL 1000만톤, SNG 400억~500억Nm³, Olefin 400만톤, Glycol 200만톤 생산을 목표로 하여 석탄화학 핵심공정에 대한 설계기술과 핵심설비 제작, 운전기술 확보에 노력하고 있다. 중국은 2011~2015년 기간에 석탄화학 실증 프로젝트 총투자비용은 약 6,500억위엔(1,067,300억원)에 달할 것으로 추정된다.

현재 중국은 석탄화학제품 최대의 생산공장일 뿐만 아니라 최대의 시장이다. 기존 석탄으로부터 얻어진 합성가스를 이용한 화학물질 합성기술은 대부분 해외 상용기술을 도입하여 운전하였지만, 중국정부의 지원과 주도하에 중국 자체기술을 적용한 상업화 프로젝트의 성공을 통해 점차적으로 해외기술을 자국기술로 대체하고 있는 추세이고 자국기술의 검증을 통해 해외시장 진출도 활발하게 추진하고 있다.

한 예로서 중국 선화사가 운영중인 석탄사용 화학원료 생산공정을 보면(도 9 참조), 석탄을 7,800톤/시간 사용해서 65bar 습식가스화를 통해 합성가스 53만Nm³/시간 생산하고, 메탄올을 거쳐 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등 다양한 화학원료물질을 생산하고 있다. 이 플랜트는 세계최대 석탄에서 메탄올을 생산하는 공장이면서 세계최대 메탄올-올레핀 변환공장이다.

중국 국가발전개혁위원회는 2007년 8월 30일부터 '천연가스이용정책'을 통해 천연가스 이용 메탄올 제조프로젝트를 새로 건설하거나 확대건설하는 것을 금지함에 따라 중국에서는 석탄을 원료로 메탄올을 생산하는 것이 현실적인 선택으로 되고 있다. 중국의 메탄올 생산량은 2000년의 199만톤에서 2010년에는 1575만톤으로 693% 증가하였다. 2010년 중국 메탄올 생산기업에서 사용하는 원료비율은 석탄 63.1%, 천연가스 21.15% 및 코크스로 가스가 15.8%였다.

중국내 원료별 수소생산량을 비교한 자료(도 10 참조)에 의하면, 석탄에서 수소를 얻는 비율이 2012~2022년 기간에 18% 연평균 성장할 것으로 예측되고 있다. 석탄을 통한 석유화학 원료대체가 점

차 증가하는 추세인 점은 분명해 보인다.

도 10 중국의 원료별 수소생산 실적과 시장전망.



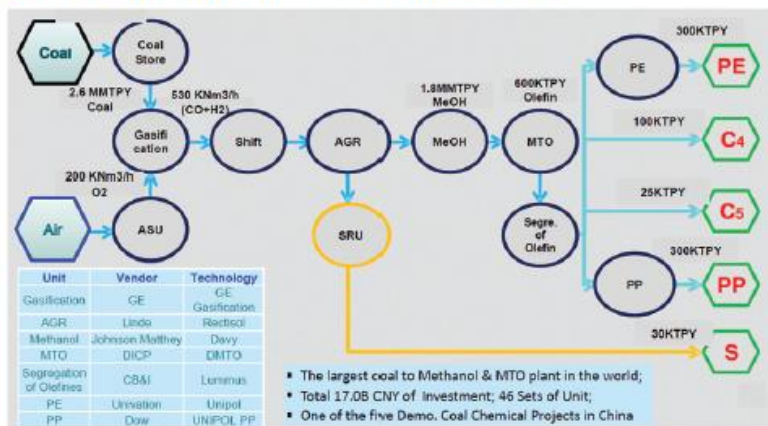
출처: Evaluation of H₂ Production at Refineries in China - The New UOP SeparALL Process and UOP Polybed PSA, 2013

5 맺음말

중국이 지난 10여년 동안 석탄화학산업에 대한 실적과 이어지는 기술개발투자 성과를 거두기 시작하면서 관련시장 주도가 예상된다. 한국도 석탄화학산업이 근간이 되는 촉매기술을 포함한 파일럿 규모의 많은 연구가 진행되었지만, 연구비의 한계, 기업의 중장기적인 사업전략 부재 등으로 실증단계로의 확대가 용이하지 않고, 결과적으로 연구결과를 사업화까지 연계할 수 있는 R&D기반의 사업모델 정립도 어려운 것이 현실이다. 이를 어떤 방향에서 어떤 계기를 통해 타개할 수 있을지에 대한 많은 고민이 요구되는 시점이다.

앞으로 석탄을 사용한 화학원료 생산이 확대될 것인가 아니면 세일가스 등으로 대체될 것인가는 매우 예단이 어렵지만, 원유가격이 1980년대 가격으로 장기간 돌아갈 경우는 없어 보인다. 한국은 주위에 석탄을 싸게 공급해 줄 곳도 없으므로 석탄산지에 진출하는 방안도 필요하다. 하지만 최근 한국석탄공사의 몽골 탄광 투자실패 사례가 보여주듯 다양한 측면에 대한 정확한 인식없이는 쉽지 않다. 석탄에서 다양한 화학원료 물질을 저렴하게 생산하는 대안에 대한 고민과 에너지여량플랜트산업으로도 발전시킬 방안은 없는지, 어떤 기술을 고유기술화하고 어떤 기술은 도입이 적정한지 등 다양한 측면의 내실있는 방향 제시가 필요하다. 중국에 의해 다시 활성화되는 석탄화학산업이지만, 한국 입장에서는 자의가 아닌 타의로 이끌려가는 상황이 안되도록 산업계의 신속한 대응도 필요하다. **Insight TIP**

도 9 중국 Shenhua Baotou Coal Chemical Co.의 MTO 플랜트 흐름도



출처: Alex Qin, China MTO Demo Project Shenhua Baotou, Gasification Technologies Conference 2012