

# 2000년 이후 석탄액화기술의 동향

윤 용 승

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

<http://pec.iae.re.kr>

[ysyun@iae.re.kr](mailto:ysyun@iae.re.kr)

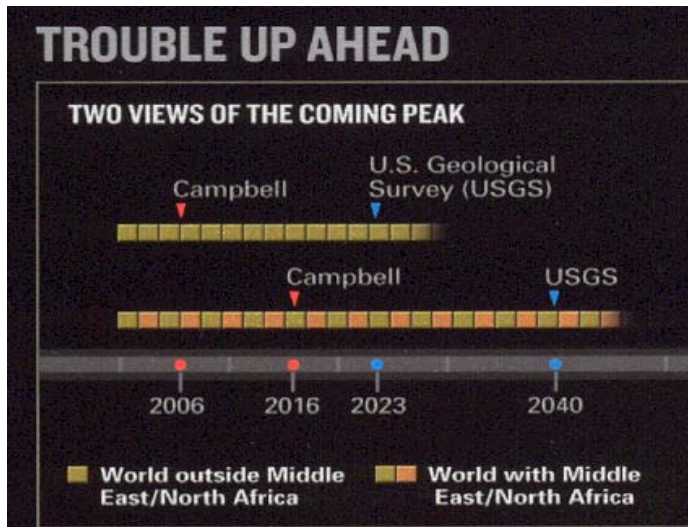
## 1. 배 경

2000년대 들어 원유의 매장량과 생산정점이 수십년 내에 도달할 것이라는 장기적 수급 문제에 대한 분석자료가 발표되고, 2005년 이후에는 고유가가 지속될 것이라는 보도가 계속되고 있다. 중국과 인도 등 필두로 한 아시아 국가들의 에너지 수요가 급격히 늘고 있는 상황과 지정학적 정치적 이유들로 인하여 장기적인 에너지 수급에 대한 관심은 최근 들어 각국이 더욱 관심을 갖고 대안을 찾는 상황이 되었다.

국내 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하는 국내 현실에서는 종던 싫던 이미 원유를 근간으로 구축되어 있는 사회 에너지 인프라를 그대로 사용하기 위해서는 원유 대체 방안에 대한 노력도 필요한 시점이다.

석탄액화 분야를 보면 중국은 이미 세계에서 가장 큰 석탄 직접액화 플랜트를 건설하고 있고, 조만간 간접액화 플랜트도 건설하여 2007년까지 연간 1백만톤을 생산할 계획을 가지고 있다. 이 규모는 2차세계대전 당시 독일이 생산하여 자체 유류 수요의 90%를 공급하던 양의 1/4 규모이고 남아공에서 간접액화 공장에서 자체 수요의 60%까지를 최대 생산할 당시의 1/10 규모이다.

신재생에너지가 장기적으로는 기존의 화석연료를 대체하겠지만 그 시기는 30-40년 이후가 되어야 가격적인 경쟁력까지 갖추고 양적인 면에서도 의미 있는 에너지원이 될 것으로 대부분 예측하고 있다. 화석연료 중에서도 원유는 National Geographic지 2004년 6월 기사에 실린 [그림 1]에 나타난 바와 같이, 원유 생산의 정점은 비관적으로 보면 2016년에 도달하고 희망적으로 보더라도 2040년이면 정점이 되어 이후로는 원유값이 크게 폭등할 가능성이 있다. 원유와 비교하여 석탄은 향후 전세계가 250년 이상을 사용할 양이 전세계에 비교적 고르게 분포되어 있어서 석탄액화를 통한 원유 대체효과가 최근의 고유가에 힘입어 부상하고 있다.



[그림 1] 원유 생산정점 시기 예측자료 (National Geographic, 2004. 6).

천연가스의 GTL (Gas-To-Liquid)기술에 대한 관심도 최근에 높아지는데 비례해서 그 원천기술 이었던 석탄 액화기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 중국에서의 석탄액화 프로젝트들이 추진됨에 따라 그 영향이 중장기적으로 국내에도 미칠 수밖에 없어 보인다.

## 2. 석탄액화 기술

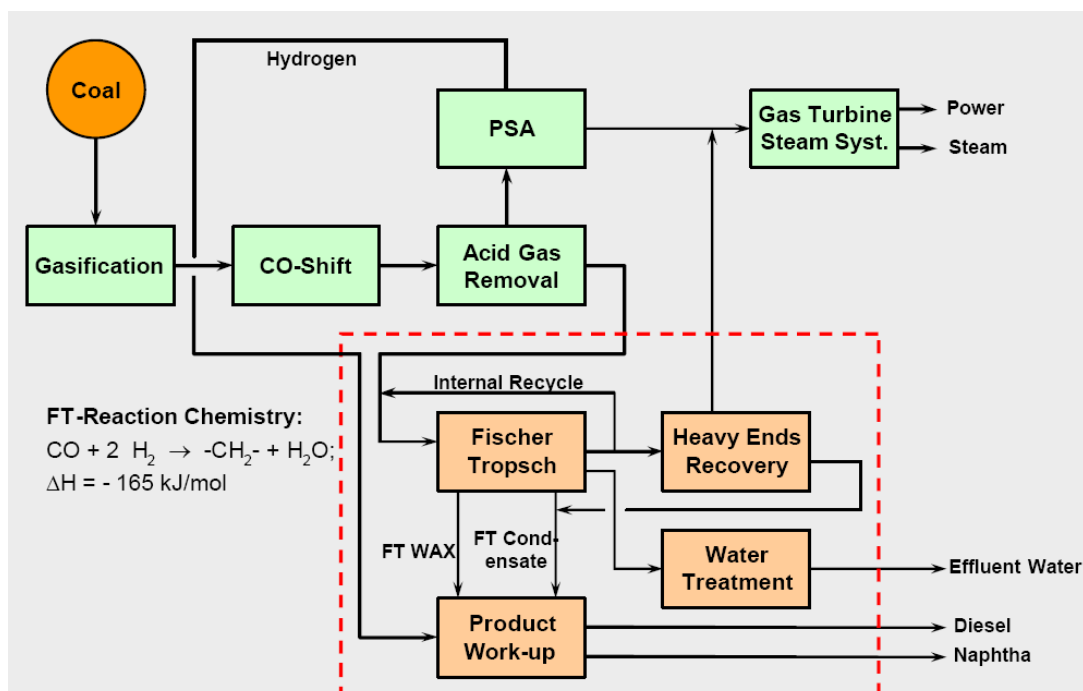
석탄은 휘발유나 디젤유에 비하여 원료 자체에 함유되어 있는 수소 함량이 낮으므로 액화과정에서 다량의 수소가 첨가되어야 하는데, 이 과정에서 비용이 크게 증가한다. 따라서, 남아공에서와 같이 국가적 지원이 없다면 원유가격이 배럴당 미국달러로 35불 이하에서는 거의 가격경쟁력이 없다. 이것도 대규모 석탄액화 공장일 경우의 예이지 소규모 액화공장의 경우에 제조 단가가 이보다 크게 증가하게 된다.

액화방식에는 직접액화와 간접액화 방식이 있다. 직접액화의 가장 핵심인 고온고압하에서 석탄에 수소를 첨가하는 기술은 독일의 Friedrich Bergius 에 의해 처음 개발되었고, 간접액화의 핵심인 일산화탄소의 수첨반응은 독일의 Franz Fischer, Hans Tropsch, Helmut Pichler 에 의해 개발되었다. 1930 년대에 독일에서 이들 기술들이 상용급으로 개발되어, 상용급 액화설비들은 이미 2 차 세계대전 당시 독일에서 상용화되어 사용되었고, 1945 년 전쟁말기에 독일에는 9 기의 석탄 간접액화공장과 10 기의 석탄 직접액화 공장에서 연간 4 백만톤의 연료유를 생산하여 독일이 필요로 하였던 수요의 90%를 충족시켰다. 70 년대의 남아공에서는 간접액화 방식을 사용하여 최대로 생산할 때는 연간 1 천만톤의 연료유를 생산하여 남아공 원유수급량의 60%를 담당하기도 하였다.

직접액화는 액체 솔벤트와 함께 석탄을 수소와 400°C 이상, 100 기압 이상에서 촉매를 사용하여 반응시킨다. 간접액화 방식보다는 전환수율이

직접액화 방식에 의한 연료유는 연소할 때에 soot 가 많이 발생하는 등 문제가 있고, 간접액화 방식은 석탄을 먼저 가스화 시키고 생산된 일산화탄소와 수소가스를 정제한 후 촉매를 사용하여 탄소를 하나하나씩 다시 결합시켜 휘발유까지 만드는 경우로서 비용이 높은 편이다.

[그림 2]는 최근 미국과 일본, 중국 등에서 상용급으로 추진하고 있는 전기 및 스팀 생산과 합성연료유를 동시에 생산하는 개념의 석탄 간접액화 공정의 개략도를 보여주고 있다.



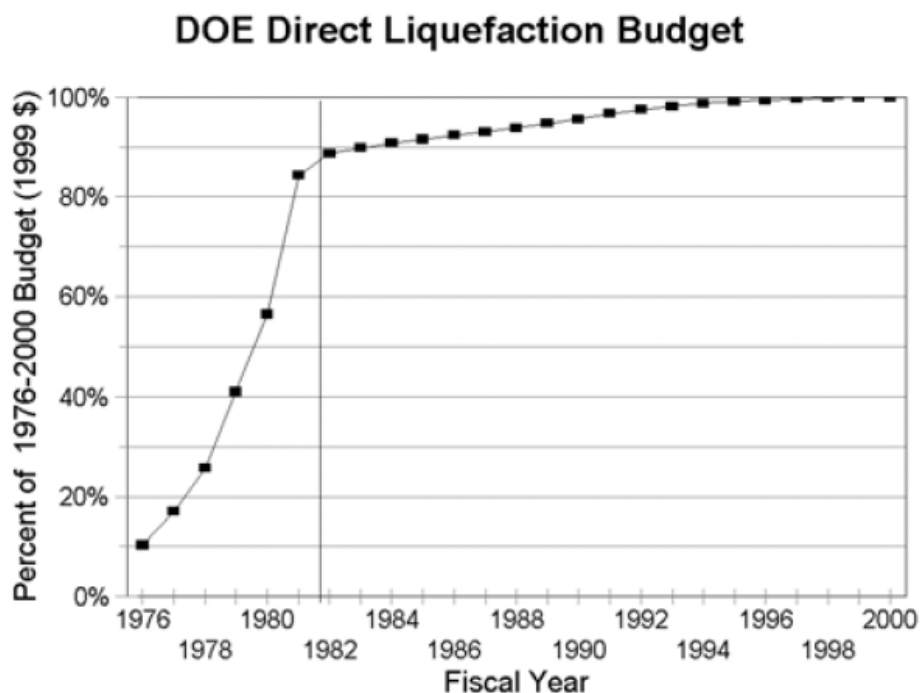
[그림 2] 석탄 간접액화 공정흐름도

### 3. 해외의 석탄액화 기술

#### 3-1. 미 국

미국은 2차 세계대전 이후 독일에서 입수한 문서를 바탕으로 Fischer-Tropsch 기술에 관심을 가지고 첫번째 사용급 액화플랜트를 텍사스주 Brownsville에 건설하였다. 석탄의 직접액화와 간접액화에 대한 파일럿규모의 설비도 1950년에 루이지애나주 캔사스에 소재한 US Bureau of Mines에서 운영되었다. 그러나, 1950년대와 1960년대에는 중동산 원유의 개발로 인해 저유가가 유지되면서 더 이상의 진전은 이루어지지 않을 듯하였다.

[그림 3]은 미국 에너지성에서 1976년부터 2000년 사이에 석탄의 직접액화 프로젝트에 사용된 총 예산 36억불을 100%로 하여 연도별로 얼마나 사용되었는지를 도시한 그림으로서, 1976년부터 1982년의 오일쇼크 기간 동안에 대부분이 사용되었음을 보여주고 있다. 이들 기간에 여러 석탄 직접액화 공정에 대한 기반연구와 상용연구가 이루어졌다.



[그림 3] 미국 에너지성의 76-2000년 기간 사용된 석탄 직접액화 예산 (ACS Fuel Chem. Division Preprints 2003, 48(1), 149).

1970년대와 1980년대 석탄 직접액화 공정에 대한 실증 연구가 많이 진행

되었는데 주요한 공정으로는 Exxon Doner Solvent (EDS) 공정, Hydrocarbon Research Inc. (HRI) H-Coal 공정, Solvent Refined Coal (SCR) Boiler Fuel 공정, SRC-II Distillate Fuels 공정들이 있다. HRI사는 이후 HTI사가 된다. 이후 이 공정들은 Integrated Two Stage Liquefaction (ITSL) 공정과 Continuous Multi-Stage Liquefaction (CMSL) 공정으로 개발되게 된다.

이 기간 동안의 가장 큰 성과는 직접액화의 수율을 현저히 증가시킨 것으로서, <표 1>의 결과에서 액화성분에 해당하는 Total Distillate 수율을 보면 1980년대에는 수분과 회분을 제외한 석탄 성분을 기준으로 47-50%가 액화유로 뽑을 수 있었지만 1994년 CMSL 공정에 이르면 이 수율이 72.3%까지 증가함을 볼 수 있다.

<표 1> 미국 석탄 직접액화 공정의 개발에 따른 액화 수율의 증가 결과  
(미국 일리노이탄 사용)

<u>Process</u>	<u>SRC-II</u>	<u>H-Coal</u>	<u>EDS</u>	<u>ITSL</u>	<u>CMSL</u>
<u>Year</u>	1980	1981	early 80s	1989	1994
<u>Yield, wt % MAF Coal</u>					
Heterogases	12.9	11.3	17.4	15.2	15.2
C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub> gas	14.5	12.8	19.0*	5.4	11.4
Naphtha	19.3	22.9	22.8	14.5	20.7
Middle Distillate	25.2	20.0	17.0	21.7	39.1
Gas Oil	4.9	7.6	4.4	29.6	12.5
Total Distillate	47.3	50.5	44.2	65.8	72.3
H Consumption, wt %	5.0	6.0	5.9	6.0	7.5

(Ref. : ACS Fuel Chem. Division Preprints 2003, 48(1), 150)

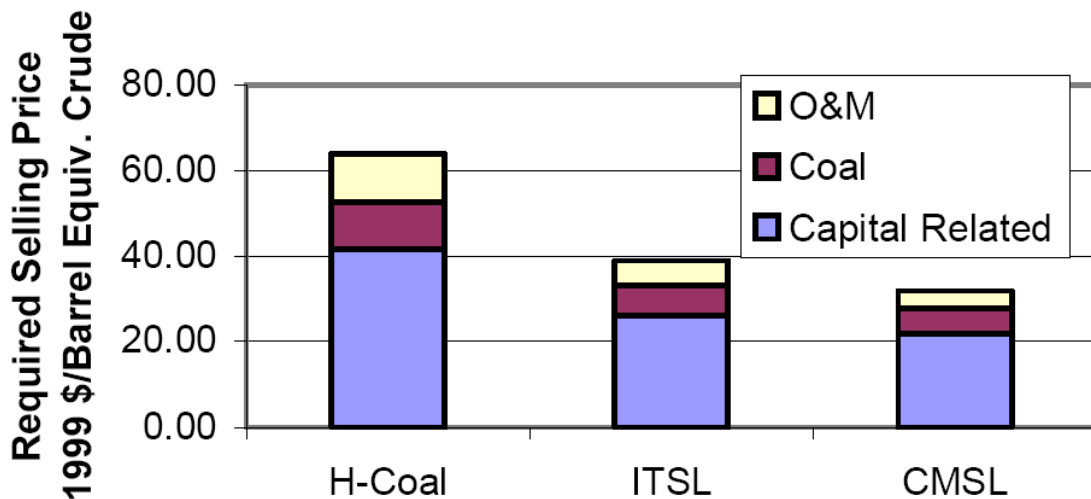
<표 2>에는 각 석탄액화 공정에 따른 합성액화유의 성분과 특성을 기존의 원유의 자료와 비교하였다. 일반적인 원유에 비해 질소와 유황함량이 낮고 중금속인 바나듐의 함량이 거의 없음을 볼 수 있고 끓는점도 원유보다 직접액화유가 더 낮음을 알 수 있다. 이들 자료는 합성액화유가 기존 원유에 비해 사용할 때에 환경오염물질을 훨씬 적게 배출할 것임을 보여주고 있다.

이 기간 동안 개발된 각 석탄 직접액화 공정에 의한 합성연료유 생산단가를 1999년도 달러기준으로 환산하여 비교한 결과를 [그림 4]에 나타내었다. 여기서 H-Coal 공정은 원유 배럴당 64불, ITSL 공정은 38불, CMSL 공정은 배럴당 32불의 원가로 추산되었다.

<표 2> 석탄 직접액화 공정별 생산된 액화유의 성상

	<u>H-Coal</u>	<u>ITSL</u>	<u>CMSL</u>	<u>Typ. Crude</u>
Carbon, wt %	86.63	85.72	86.57	85.80
Hydrogen, wt %	10.54	11.48	13.08	13.00
Nitrogen, wt %	0.50	0.49	44 ppm	2000 ppm
Sulfur, wt %	0.19	0.07	0.06	1.00
Oxygen, wt %	2.13	2.24	0.44	
Vanadium, ppm	nil	nil	nil	200
650 °F <sup>-</sup> , wt %	83	79	80	53
975 °F <sup>+</sup> , wt %	0	0	0	20
Gravity, °API	27	22	38	32

(Ref. : ACS Fuel Chem. Division Preprints 2003, 48(1), 151)



[그림 4] 미국에서 개발된 석탄 직접액화 각 공정별 생산 합성유의 원유 대비 1999년 달러로 환산한 생산원가 (ACS Fuel Chem. Division Preprints 2003, 48(1), 151).

1991년도에 DOE는 Advanced Concepts for Direct Coal Liquefaction Program을 시작하였는데, 주요 목적은 액화비용을 낮추는 것이었다. 이전에 비해서 액화비용을 상당히 낮추었지만, 원유에서 생산되는 제품과는 아직도 가격 경쟁성이 낮았다. 2단 액화기술이 개발되어 석탄액화를 통한 휘발유 비용을 원유 38 달러/배럴선까지 낮추었으나, 그 당시 원유가격보다는 훨씬 높았다. 다른 주요한 프로그램의 목표는 FT 촉매의 개발이었고, 1950년 US Bureau of Mines에서 사용한 촉매의 활성을 1로 하였을 때 1996년 개발된



FT 촉매의 활성은 43에 달하였다.

2003년도에 DOE에서 프로젝트 지원을 결정한 Gilberton Initiative는 총 6.12억불이 투입되는데 미국 정부에서는 1억불을 지원해주고 있다. 미국 펜실베이니아와 일리노이주 탄광 근처에 야적되어 있는 무연탄 폐석을 하루 4,700톤을 가스화하여 합성가스를 생산하고 41 MW의 전기와 더불어 하루 5,000 배럴의 초청정 합성연료유를 생산하는 프로젝트이다. 이러한 무연탄 폐석은 펜실베이니아주에만 2-3억톤이 산적되어 있어 처리가 필요한 상황이므로 이를 신석탄발전 기술로 활용하려는 목적이다.

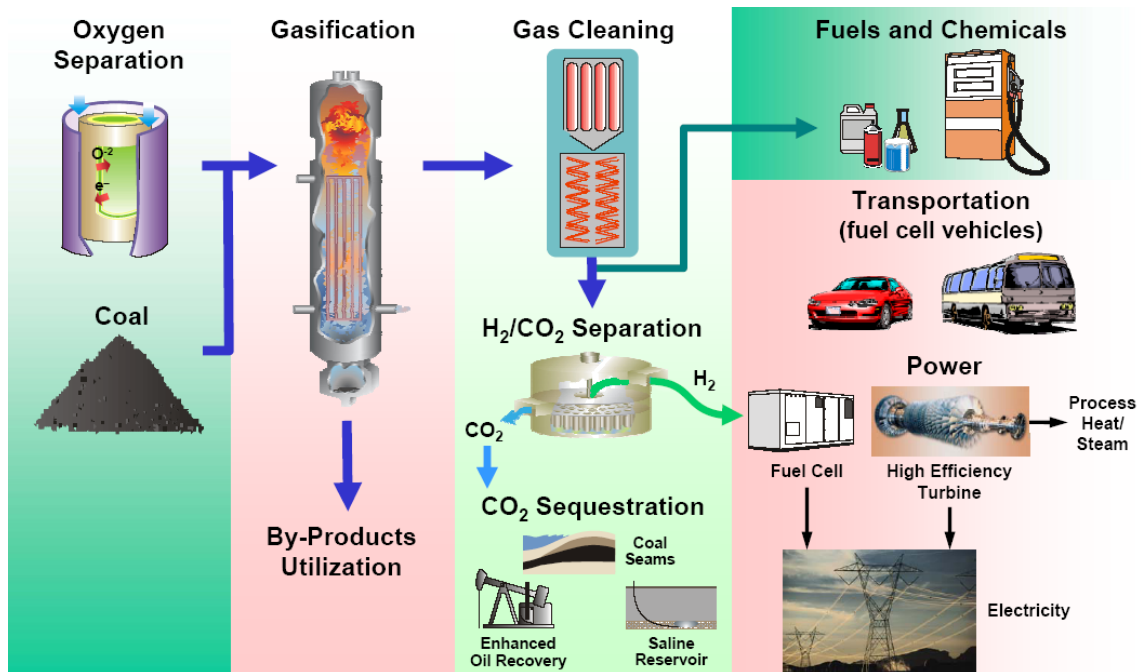
중국에 석탄 직접액화기술을 수출하여 내몽골 지역에 액화공장을 건설중에 있는 미국 HTI사는 Headwaters Incorp.의 자회사로서, 케터키주 Cattlesburg에 아래 [그림 5]에 나타난 바와 같은 600톤/일급 파일럿 액화 설비를 운영중이다.



[그림 5] 미국 HTI사의 600톤/일급 석탄액화 파일럿 플랜트 전경.

미국은 현재 에너지성에서 초청정 액화유를 생산하기 위한 2개의 대형 CTL (Coal-To-Liquid) 프로젝트를 지원하고 있는데, Waste Management Processors, Inc.의 폐무연탄을 사용하는 Gilberton Initiative와 정유 코크스를 사용하는 Early Entrance Coproduction Plant (EECP) CTL 프로젝트이다 (ACS Fuel Chem. Div. Preprints 2005, 50(2), 756).

미국의 FutureGen 프로젝트에서도 아래의 [그림 6]의 오른쪽 상부에서 보이는 바와 같이 석탄 간접액화를 통한 합성연료유를 생산하는 내용이 포함되어 있다.



[그림 6] 다양한 에너지원 생산을 목표로 하는 미국 FutureGen 프로젝트에서의 석탄 간접액화 방식.

### 3-2. 일 본

일본은 석탄 직접액화공정에 대한 개발로서 NEDOL공정 (1983-2000년, 18년간)과 BCL (Brown Coal Liquefaction) 공정(1981-2002년, 21년간)을 추진하여 왔다. 이중 NEDOL 공정 기술개발의 연도별 내용을 [그림 7]에 나타내었다.

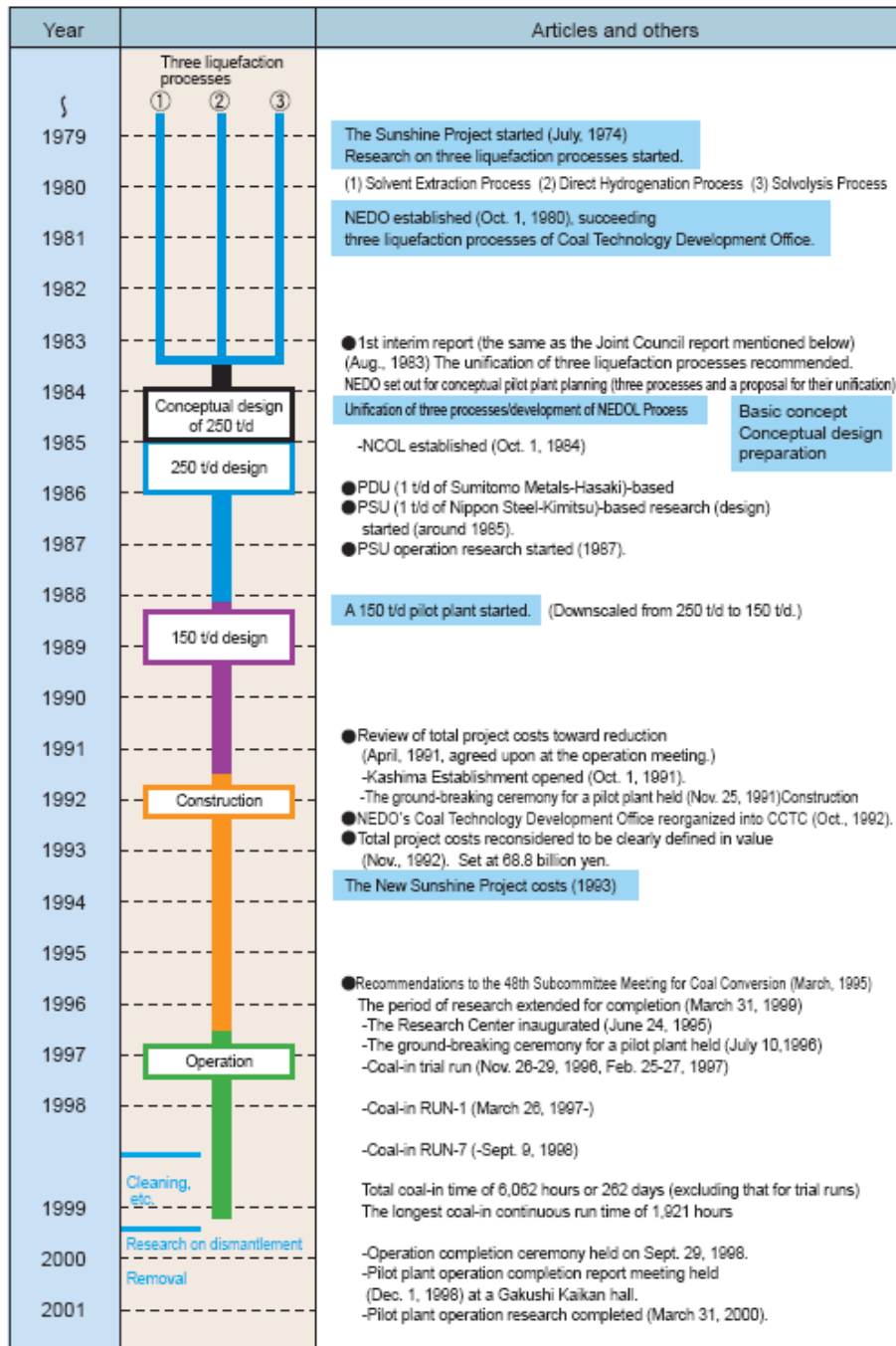
일본은 18년간 개발한 NEDOL 석탄직접액화 공정을 만주와 내몽골 지역에 상용 플랜트 건설을 추진하고 있으나, 내몽골 지역 프로젝트는 미국 HTI사가 수주하여 건설중에 있고 만주쪽에서도 지난 10여년 이상 공을 들여 오고 있으나 실제 상용 플랜트 프로젝트로는 연계가 안되고 있다.

NEDOL 공정의 개념은 [그림 8]에 나타난 바와 같이, 고온고압에서 석탄 슬러리를 철촉매하에서 용매로부터 수소공여 반응을 시켜 액화유를 합성하는 반응이 핵심이다. 아래의 [그림 9]는 일본에서 운영한 NEDOL 석탄액화 공정 플랜트의 모습으로 150톤/일급 규모로 450°C, 170 기압 조건에서 석탄액화가 수행되었다.

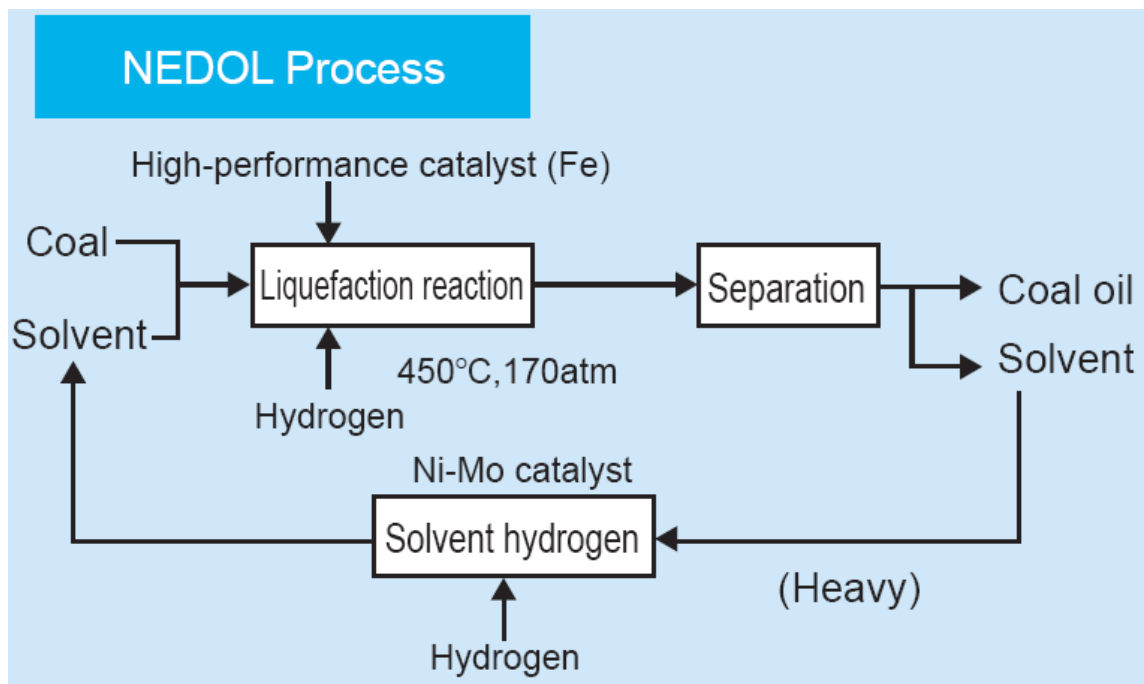


BCL 공정개발은 50톤/일급 파일롯 설비를 호주에 건설하여 실증하였다. 그 설비의 사진을 [그림 10]에서 볼 수 있다.

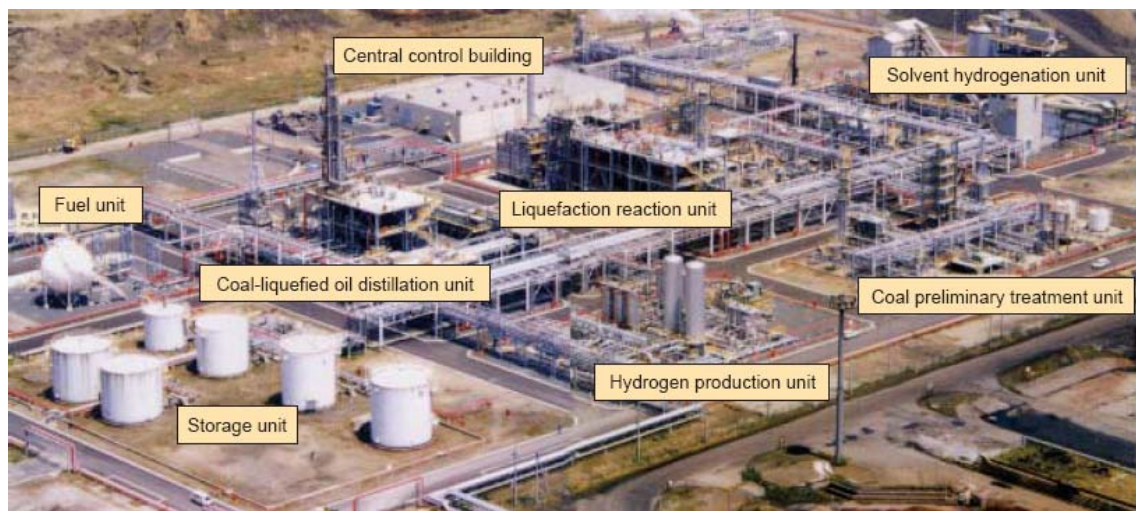
현재 일본정부는 석탄액화에 대한 대형 설비실증 기술개발 투자를 본격적으로 하지않고, 일본내 여러 대학에 기반연구를 꾸준히 지원하여 핵심 원천기술의 발견이 이루어지도록 지원하고 있다.



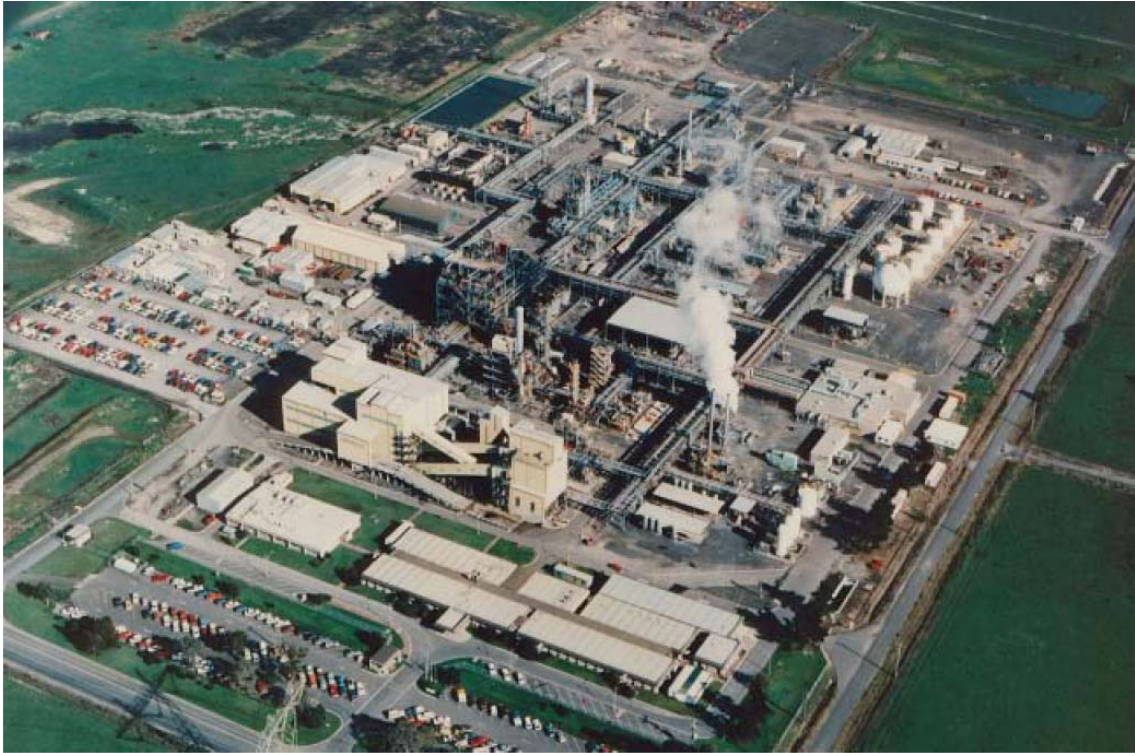
[그림 7] 일본 NEDOL 석탄 직접액화 공정 프로젝트의 연도별 내용.



[그림 8] NEDOL 공정의 개념 개략도.



[그림 9] 150톤/일급 일본 NEDOL 석탄 직접액화 파일럿 플랜트 전경.



[그림 10] 호주 빅토리아주에 건설 운영된 50톤/일급 일본 BCL 석탄 직접 액화 파일럿 플랜트 전경.

### 3-3. 남아프리카공화국

1970년대에 인종차별 정책으로 인하여 원유수입이 중동산유국에서 금수조치가 될 우려가 높아짐에 따라서 자체적으로 독일에서 사용되었던 석탄 간접액화 방식을 개발하게 되었고 정부의 보조금에 의하여 경제성이 유지되었다.

남아프리카공화국 SASOL사에서 현재 저급 석탄으로부터 하루 15만배럴 이상의 액화연료유를 생산하고 있으며 남아공 내의 버스, 트럭, 택시에 연료로 사용중이다.

## 4. 국내 주변에서의 석탄액화 프로젝트 현황

### 4-1. 중 국

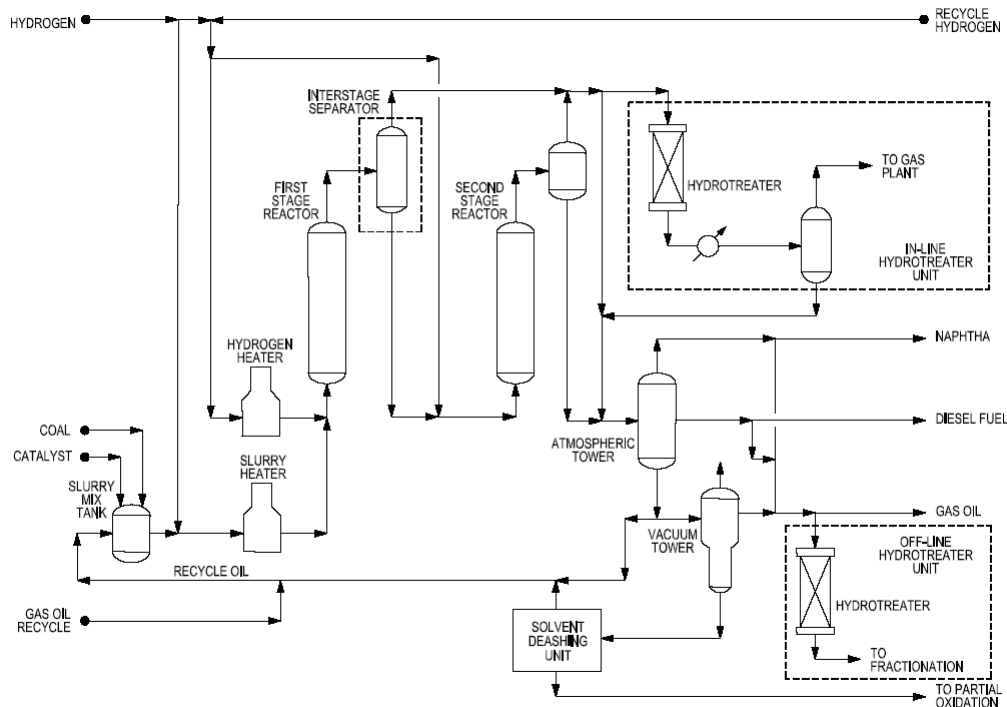
중국은 2007년까지 석탄 직접액화에 의한 생산규모를 연간 1백만톤으로 계획하고 있고, 2013년까지 중국 전체 원유수입량의 10%를 석탄액화유로 대체코자 하고 있다고 2005년 1월 24일자 중국 인민일보 인터넷판 ([http://english.people.com.cn/200501/24/eng20050124\\_171675.html](http://english.people.com.cn/200501/24/eng20050124_171675.html))은 보도하고 있다.

2002년 중국에서 최대 석탄회사인 Shenhua Group Corp.이 내몽골 자치구 Baotou 130 km 남부에 위치한 Majiata에 석탄 직접액화 공장을 짓기로 발표한 이후 현재 건설중이며 2007년 하반기에 운전을 시작할 예정이다. 1단계 석탄직접액화 프로젝트에는 총 20억불이 소요되고, 정부은행인 Bank of China에서 자금을 지원하고 독일의 ABB Lummus Global이 전체 프로젝트 관리를 수주하여 진행하고 있다. 이 건설사업은 2005년도 중국 개혁개발 위원회에서 2005년도 중국 10대 핵심 건설사업의 하나로 고려되고 있다고 위에 명기된 인터넷판 기사에서 보도되고도 있다. 2단계 프로젝트는 정부 승인단계에 있다고 알려져 있고 3개의 석탄직접 액화공장을 더 건설할 계획이다.

직접액화 프로젝트의 기술은 미국과 일본의 기술들이 경합하여 미국 DOE에서 개발된 직접액화 방식이고 미국 유타주 소재 Hydrocarbon Technologies, Inc.(HTI)에서 기술 라이선스와 공정설계, 3개의 액화반응기(2단 슬러리 phase)로 구성될 반응기 기술이 제공된다. HTI사의 석탄 직접액화 공정 흐름도는 [그림 11]과 같다.

Shenhua사는 HTI 기술의 15% 지분도 매입하여, 기술의 안정적인 지원과 향후 개발될 기술의 소유에 대한 대비도 한 상태이다. 반응조건은 2,500 psig (170기압), 800°F (427°C)이고 HTI사의 GelCat 촉매(분산 나노크기인 철 기반 촉매)를 사용한다. 하루에 13,000톤의 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.



[그림 11] 중국 내몽골 자치구에 건설중인 미국 HTI 사의 석탄 직접액화 공정흐름도 (ACS Fuel Chem. Division Preprints 2003, 48(1), 155).

또 다른 석탄액화 프로젝트는 중국 남서부 지역인 Yunnan 지구에 1995년부터 시작되었는데, 총 12.5억불을 투입하여 연간 510만톤 (일일 14,000톤)의 석탄을 사용하여 88.3만톤의 디젤 및 휘발유와 67,500톤의 LPG를 생산할 계획이다. 이 프로젝트에서 9.5년의 자금 회수기간을 예상하고 있다. 중국내 석탄액화 프로젝트가 진행중인 위치와 적용하려는 원천 액화기술을 [그림 12]에서 볼 수 있다.

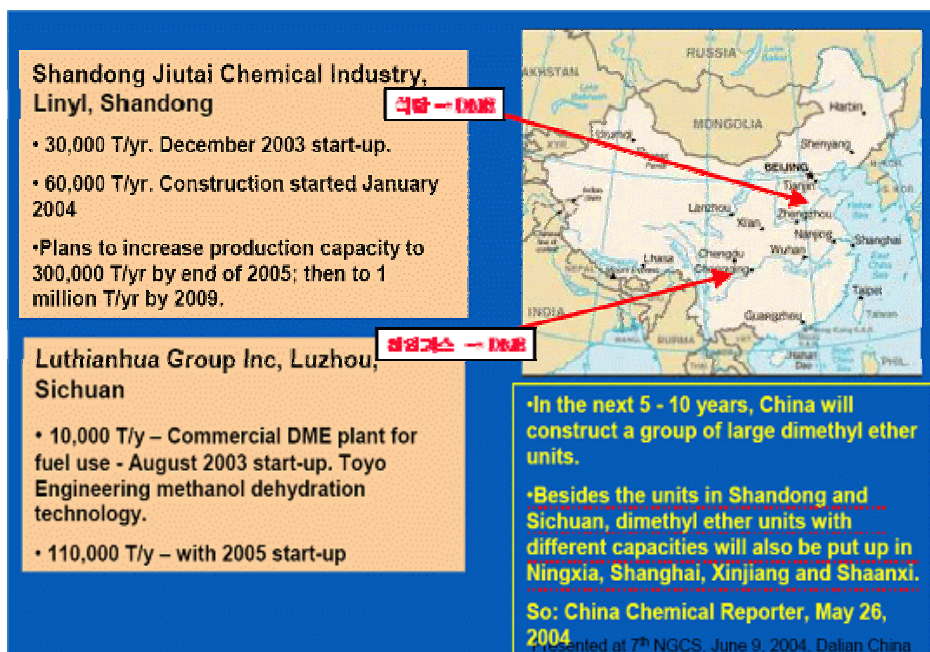
석탄액화에 대한 중국의 기술개발 내용을 살펴보면, Helongjiang 지구의 Yilan에 파일롯급 직접액화 플랜트를 1995년부터 운영중이다. 또한, Shenhua그룹은 상하이 Huayuan그룹, 상하이 전기그룹과 공동으로 석탄액화 센터를 2004년 상하이에 1,200만불을 투자 설립하여 중국에서 건설중인 석탄액화 공장의 기술지원과 운전원 훈련을 목적으로 운영을 시작하고 있다.

중국은 석탄액화를 통한 합성연료유 생산만이 아니라 최근 LPG나 디젤유 대체가 가능한 청정연료인 DME (Di-methyl Ether) 생산에도 과감히 투자를 하여 [그림 13]에서 보는 바와 같이 이미 석탄과 천연가스로부터 DME를 생산하고 있다. 적용한 기술은 일본 기술이었다.





[그림 12] 중국  
에서 건설중이거나  
추진중인 석탄액화  
프로젝트.



[그림 13]  
2003년  
가동을  
시작한  
중국의  
석탄과  
천연가스  
사용 DME  
생산  
프로젝트  
현황.



## 4-2. 필리핀

중국에 석탄 직접액화 기술을 수출하여 플랜트를 건설한 실적을 바탕으로 미국 HTI 사가 필리핀 에너지성을 위하여 필리핀 남동부 지역에 석탄액화 hub 를 구축하는 기술적 경제적 분석을 수행중이다. 석탄의 직접액화와 간접액화를 한곳에서 통합하여 운영하는데 따른 이점을 분석하는 것도 한 목적이다.

마닐라 타임스가 2005 년 9 월 24 일(<http://www.manilatimes.net/national/2005/sept/24/yehey/business>) 보도한 바에 따르면, 이 프로젝트는 총 28 억불이 투자되어 하루 6 만배럴의 합성연료유를 생산할 수 있는 다목적의 플랜트 건설이 가능하고 전기도 같이 생산하는 다목적의 플랜트를 구상하고 있다. 합성연료유 생산량은 필리핀의 전체 운송 유류량의 15%를 담당하고 연간 32 억불의 유류비용 절감효과가 있다고 HTI사의 모회사인 Headwaters사에서 2005 년 9 월 24 일 발표하였고, HTI사는 필리핀 H&WB사와 기술제공 협약을 체결하려고 하고 있다고도 보도하고 있다

또한 같은 보도에서 필리핀 에너지차관은 약 2 억불 석탄직접액화 프로젝트는 하루 1 만톤의 석탄을 사용하여 6 만 배럴의 합성연료유를 생산할 수 있을 것으로 발표하였다.

## 4-3. 인 도

필리핀과 마찬가지로 미국의 HTI 사가 인도의 아삼지역 석탄을 사용하여 상용급 석탄액화 플랜트 건설의 타당성을 Oil India Limited 를 위해 수행중이다. 아삼지역 석탄은 HTI 사 석탄분석에 의하면 지금까지 시험한 석탄중 가장 반응성이 좋은 석탄이었고 이에 따라 석탄액화의 경제성도 우수할 것으로 예상되어 진다고 보고하고 있다.

## 4-4. 호 주

Australian Power & Energy Ltd.(APEL)과 Syntroleum Corp.는 총 3 억불을 투자하여 빅토리아주 Latrobe Valley 에 호주 갈탄 (brown coal)을 사용하여 미국 Gilberton Initiative 와 유사하게 전기와 합성연료유를 생산할 계획을 추진중이다.

## 5. 결 론

국내에서 미국이나 일본과 같은 대형 석탄액화 기술개발을 하는 것은 투자 규모면에서 감당하기가 어렵고, 중국과 같이 자체 석탄매장량이 풍부하고 원유에 대한 수요가 급격히 높아져 석탄자원을 최대한 활용한다는 차원에서 추진되는 대형 석탄액화 프로젝트를 따라갈 여건도 아닌 것으로 보인다. 그렇다고 원유는 생산되지 않고 막대한 비용을 치루고 수입해야 하는 국내 상황에서 기술적인 대비를 하지 않을 수도 없는 상황이므로, 국내 여건에 맞는 틈새시장을 찾아야 할 것으로 판단된다. 석탄 직접액화는 주요 기술이 석탄에 수소를 투입하는 기술에 있으므로, 국내에서도 수소가 충분히 함유되어 있는 폐기 플라스틱 등을 혼합하여 중소형 액화공정을 자립하여 나가는 방향이 옳을 것으로 보인다.

자금과 기술이 부족한 국내 현실에서 상용 기술과 원유나 석탄액화유를 필요하면 사오면 되지 않느냐는 생각도 일면 잘못된 생각은 아닐 수 있으나, 아무런 준비와 무대책은 아래 사진과 같은 교통수단을 감수할 각오가 되어야 할 것 같다.



[그림 14] 무대책으로 원유 고갈을 맞을 때 사용 가능한 미래의 자동차.