

# 자동차용 액상 합성연료의 동향

## Status & Prospects of Synthetic Fuel Technologies for Automobiles



김 종 원 · 한국에너지기술연구원 센터장  
Jong Won Kim · Korea Institute of Energy Research

### 1. 서론

소요 에너지원의 97%정도를 해외에 의존하는 실정에서 최근의 고유가로 인해 2000년 현재 원유수입액이 300억\$가 넘어서 국가 경제에 큰 부담이 되고 있을 뿐만 아니라 수송용 연료의 사용에 따라 특히, 인구가 밀집한 대도시 지역의 대기오염도는 우려할만한 상황에 이르렀다. 국내 자동차 등록대수는 1999년 현재 이미 1,100만대를 넘어서 전체 석유 소비량중 30%에 해당하는 28,476 천 TOE이 수송 연료로 쓰이고 있으므로 그 양도 막대할 뿐만 아니라 등록차량 중 30%가 매년, 아황산가스 배출에 대한 기여도가 높은 디젤차량이어서 청정하면서도 석유계 연료를 대체할 수 있는 연료에 대한 관심이 높아지고 있다.

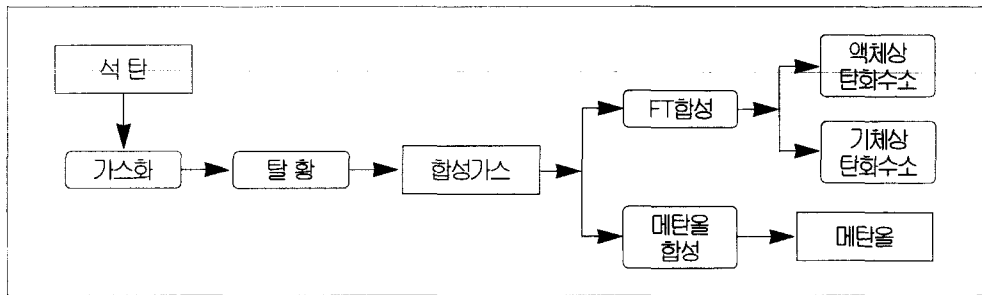
### 2 합성연료 기술현황

통상 액상 대체연료 생산 기술을 말할 때 천연가스에서 액상화합물을 얻는 GTL(Gas-To-Liquids) 기술을 대표적으로 들고 있으나 석탄으로 액상 화합물

을 만드는 기술이 역사적으로 더 오래된 기술이다. 석탄이나 천연가스와 같은 1차 에너지원으로부터 액체연료 생산기술은 크게 간접합성법과 직접합성법으로 나눌 수 있는데 1973년 중동전쟁으로 인하여 석유가격을 3\$에서 30\$로 급등한 「석유에너지 위기」 이후, 대처 방안으로 선진제국에서는 활발히 연구되었다. 원료인 천연가스나 석탄(탄소)은 화학적으로 안정하기 때문에 실용화된 공정에서는 화학반응에 적합한 활성을 갖는 중간체를 경유하여 간접적으로 원하는 최종 화합물을 합성하고 있다. 통상 활성중간체로는 합성가스(CO+H<sub>2</sub>인 혼합기체)가 쓰이는 경우가 많다. 간접법은 반응 자체와 생성물의 제어가 용이하나, 합성가스 제조 비용이 전체의 60%를 차지할 만큼 에너지소비가 많다는 단점이 있어, 합성가스 등의 중간체를 경유하지 않고 직접 원하는 화합물을 합성하는 공정에 대한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다.

석탄을 반응활성이 있는 중간체를 경유하여 <그림 1>과 같은 경로로 최종생성물로 변환하는 공정이며

## 특집 자동차 연료 및 윤활유



〈그림 1〉 석탄의 간접액화 반응 공정의 개략도

중간체로서는 고온에서 산소 및 수증기로 개질한 합성가스를 주로 사용하고 있다. 합성가스로부터 얻은 액체연료는 자동차 연료로서 중요한 가솔린 혹은 경유 등의 탄화수소, 메탄올, 알코올 혼합물 등 여러 종류가 있다. 이러한 생성물을 얻기 위한 합성반응에 사용하는 촉매는 원료가스인 합성가스중에 황화합물 혹은 질소화합물이 포함되어 있으며 아주 쉽게 피독되어 기능이 저하되므로 정제과정을 거치며 따라서 유황이나 질소의 농도는 무시할 정도로 낮아진다. 그러므로 석유제품과는 달리 간접합성에 의한 생산제품 중에는 유황분과 질소성분이 없다는 것이 가장 큰 장점이다.

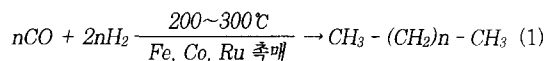
### 2.1.1. 석탄으로부터 합성가스의 제조 공정

석탄중의 탄소성분을 수증기 개질과 혹은 부분산화 과정을 거쳐 합성가스를 만드는 공정인데 석탄의 물리화학적이 성질이 매우 복잡하기 때문에 상업화 단계에 이른 것은 Lurgi, Winkler, Koppers-Totzek, Wellman-Galusha, GI 등 손으로 꼽을 정도에 불과하며 이중 Lurgi 공정이 가장 대표적이다. 갈탄에서 도시가스를 제조할 목적으로 1930년 전후 독일의 Lurgi사에서 개발한 초기에는 상압에서 운전되었으나 현재는 30기압 전후의 가압 상태에서 가동하고 있다. 남아공화국의 SASOL사에서는 가솔린 등을 합성할 목적으로 Lurgi 법으로 7만톤/일의 석탄가스화를 행하고 있다. 미국에서도 Lurgi Mark

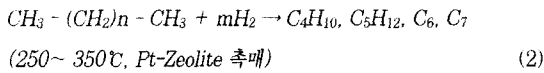
VI 가스화로를 사용한 상용규모의 공장이 North Dakota 지역에 있는데 1984년 조업을 시작하였으며, 갈탄을 이용하여 1993년에 4.78백만 m<sup>3</sup>의 합성 천연가스(SNG)를 생산하였다.<sup>(1)</sup>

### 2.1.2. Fischer-Tropsch (FT) 합성 공정

화석연료 특히 석탄으로부터 액상의 탄화수소를 합성하는 방법으로 잘 알려져 있는 FT합성은 Fe, Co, Ru 등을 촉매로 하여 상압~30기압, 200~300℃의 반응조건에서 합성가스를 반응시켜, 주로 직쇄상의 탄화수소를 생성하는 (1)식과 같은 반응이다.



FT 합성의 경우 촉매와 반응조건에 따라서 n값은 1에서 50 또는 70, 심지어는 100까지 될 수 있으므로, 생성되는 탄화수소는 넓은 분자량 분포를 가지고 있으며 특정 화합물만이 선택적으로 얻어지지 않는다. 현재 남아공화국의 SASOL사는 1950년대부터 석탄간접액화법으로서 FT 합성기술을 유일하게 실용화하였으며 기술개발을 진행하여 1995년 고정층 유동반응기(Fixed Fluid)와 액상 슬러리반응기(SPD, Sasol Slurry Phase Distillate) 등을 사용한 공장의 상업적 조업을 시작하였다.



고정층 유동반응기는 저급 올레핀과 가솔린의 생산에 또한 슬러리상 반응기는 왁스와 디젤연료의 생산에 사용하고 있다. SASOL사는 SASOL I, SASOL II, SASOL III의 석탄액화공장을 가동하여 연 400만톤, 저급 올레핀으로부터 왁스에 이르기까지 100종 이상의 제품을 생산 판매하고 있다. 제품의 중간유분은 FT 합성유이기 때문에 유황 함유량은 사실상 없으며 또한 세탄가도 아주 높아 디젤연료 또는 디젤연료 혼합제(Blend)로도 유용하다.

### 2.2 석탄의 직접액화

미분화시킨 석탄을 중질유에 분산시켜 촉매 존재 하에서 440~450°C, 150~300기압의 조건에서 석탄 구성 분자를 수소화 분해시켜 액상탄화수소로 만드는 <그림 2>와 같은 공정이다.

이 기술은 오래된 기술로서 제 2차 세계대전중 독일에서 군용연료제조를 목적으로 전성기를 맞이한 적이 있었으나 제품 품질은 간접액화법에 비하여 저급이어서 1940년대, 독일의 실용화공장이 운전 중단된 이후 쇠퇴의 길을 걷고 말았다. 이후 1975년에 개량공정으로 부활하여 미국, 독일, 일본 등에 대규모 실증시험이 있어 왔지만 상용화공장 건설 등 실용

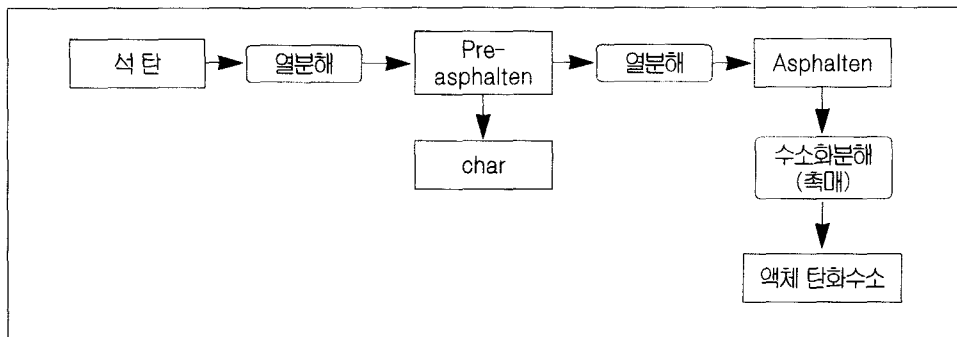
화에는 이르지 못했다. 반응에 의해 가스, 나프타, 중간유, 중질유 등의 여러 종류의 생성물이 얻어지므로 생성물은 광범위한 조성분포를 가지고 있다. 따라서 생성물자체로는 바로 사용하기 어려워 수소화 처리가 필요하며 통상 320~360°C에서 Ni-Mo계나 Co-Mo계 촉매를 사용하여 100~150기압의 조건에서 정제처리한다. 한편, 석탄중 산소는 물 혹은 이산화탄소로, 질소분은 암모니아로, 유황성분은 황화수소로 전환되어 생성물 중에 다량 잔류하게 되며, 질소분과 유황분의 잔류농도는 수%에 이를 정도로 높아서 직접액화유의 품질은 그리 좋지 않다.

### 2.3 천연가스의 간접 액화

실용화된 연료합성 공정의 대부분은 천연가스를 원료로 하는 간접액화 공정을 사용하고 있는데, 고온수증기개질은 석유화학에서 상용화된 일반적 기술이지만, 최근 에너지 절약의 관점에서 발열반응인 부분산화법에 주목하고 있다. 천연가스는 통상 석탄에 비하여 유황함유량이 적어 탈황과 기상흡착법으로 간단히 제거할 수 있기 때문에 액화생성물은 매우 청정하다.

### 3. 액화석탄의 개질과 액화수소

Ni계 촉매를 사용하여 700~800°C에서 천연가와 수증기와의 반응시켜 높은 수율로 합성가스를 얻



<그림 2> 석탄의 직접 액화 반응의 개략도

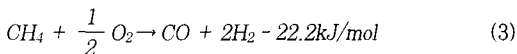
## 특집 자동차 연료 및 운활유

는 반응은 심한 흡열반응이면서, 생성가스중의 H<sub>2</sub>/CO 비율이 3/1로 통상의 탄화수소계 액체연료의 조성비로 볼 때 수소과잉이므로 총괄효율을 높이는 것이 과제이다.

촉매를 사용하여 메탄과 산소로부터 합성가스를 만드는 방법으로서, 합성가스의 새로운 제조 방법으로 주목을 받고 있다.

### (1) 부분산화법

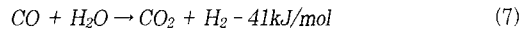
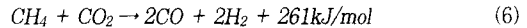
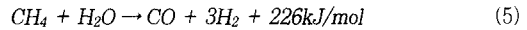
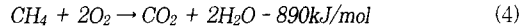
메탄이 1단계로 합성가스로 전환될 때에는 (3)식과 같은 발열반응이 되며 평형 전환율은 실온에서도 100%에 근접하게 된다. 이 반응의 특징은 H<sub>2</sub>/CO 비가 2:1로서, 메탄올이나 FT 합성에 적합하다. 1,300℃ 이상의 고온에서는 무촉매로도 반응하지만 촉매를 사용함으로써 저온에서 고효율로 합성가스를 만들게 된다. 1992년 Fickman과 Schmidt 등<sup>(2)</sup>에 의하여 Pt 혹은 Rh계 촉매하에 930~1,130℃에서, 1993년에는 Choudhary<sup>(3)</sup>가 400~500℃ 정도의 저온에서 합성가스를 고효율로 얻었다고 보고한 이후로 구미의 기업을 중심으로 연구가 활발하였다. 비슷한 시기에 Shell은 부분산화법에 의한 합성가스 제조 공정을 이용한 상용 실증공장의 조업을 개시하여 이미 충분한 기초를 축적한 것으로 추측된다.<sup>(4)</sup>



### (2) 완전산화법

연소활성과 개질활성을 동시에 갖는 촉매(Rh, Ru, Ni, Pt, Pd, Ir 등의 금속 촉매)를 사용하여 CH<sub>4</sub>로부터 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O를 거쳐 CO와 H<sub>2</sub>로의 변환이 가능하다. 즉, 완전산화로 생성된 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>와 메탄과의 개질반응이 일어나 CO와 H<sub>2</sub>를 생성함과 동시에 역수성가스 반응도 일어난다. CO와 H<sub>2</sub>로의

평형전환율은 결국 (5), (6)의 평형이 율속단계가 된다. 두 반응 (5), (6)도 흡열반응이기 때문에 고온이 CO, H<sub>2</sub>의 생성에 유리하다. 상압에서 90% 이상의 전환율을 얻기 위해서는 827℃ 이상의 반응 온도가 필요하게 된다. 이 반응은 개질반응의 열역학적 평형으로 보아 반응온도가 낮으면 원리적으로 불가능하므로 완전산화(4)에 의한 발열을 후단의 흡열반응인 개질반응에 공급함으로써 열효율을 높이고자 시도하고 있다.



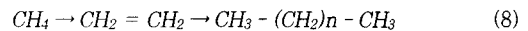
미국 Mobil사가 1960년대부터 석탄 분해 촉매 연구중에 1976년 제올라이트 계열의 새로운 촉매를 개발, 메탄올로부터 가솔린 생산시험에 성공하였으며 당시 천연가스 자원은 풍부하지만, 가솔린은 수입에 의존하고 있었던 뉴질랜드에서 1985년부터 14,500배럴/일의 가솔린 생산규모의 상용공장을 가동하고 있는 공정이다. <그림 3>에서 보인 바와 같이 합성가스로부터 먼저 메탄올을 합성한 후, 특수한 제올라이트 촉매(ZSM-5)를 써서 가솔린으로 전환한다. 메탄올 합성은 이미 잘 알려진 기술이며 노하우는 메탄올로부터 가솔린 합성과정에 있다. ZSM-5 촉매를 써서 약 10기압, 350~450℃의 조건에서 먼저 메탄올이 디메틸에테르를 경유하여 에틸렌, 프로필렌 등의 저급 올레핀으로 되고 이를 중합, 분해, 탈수소, 수소 移行 등의 과정을 거쳐 가솔린 기질유(Base Oil)가 된다. FT 합성과는 달리 ZSM-5 촉매가 지닌 구조적 특성으로 인하여 가솔린 유분에 대한 선택성이 좋아 가솔린 생성수율이 우수하며, MTG 공정의 전체 에너지 효율은 60%에 이르는 것으로 알려져 있다.

상업적으로 현재 가동중인 공장 오직 2개 뿐으로 Malaysia의 Bintulu 지역에 있는 Shell사의 Middle Distillate 공장과 남아프리카 MossGas 합성연료 공장이며 매년 세계가스 생산량의 0.1% 비율을 차지한다. 남아공화국의 MossGas사는 Mossel 항에 천연가스를 원료로 SASOL사의 순환 유동층 FT합성법을 사용한 간접액화법의 공장을 건설하여 1993년부터 년 약 60만톤의 액상탄화수소(가솔린 15,100 배럴/일, 경유 7,550 배럴/일, 등유 3,180 배럴/일 등)를 제조하고 있다. 네덜란드 Shell사는 천연가스로부터 주로 경유를 제조하는 SMDS (Shell Middle Distillate Synthesis)공정의 기초생산기술을 완료하여 말레이시아에 12,500 배럴/일 규모의 생산공장을 건설, 1993년 조업시작, 1997년 12월 조업중단 이후 2000년 5월부터 재가동하고 있다. 합성경유를 디젤연료 혼합용으로서 말레이시아, 미국(캘리포니아주)에 판매하고 있다. 아직 공업화에는 이르지 못하였지만, 미국 Exxon사도 FT 합성법의 시험공장을 가지고 있으며 기술개발에 목적을 두고 있는 것으로 확인되고 있다. 또한 미국의 Syntroleum사도 최근 FT 합성법에 의한 가솔린 합성기술을 발표하였다. FT 합성기술에서도, 반응

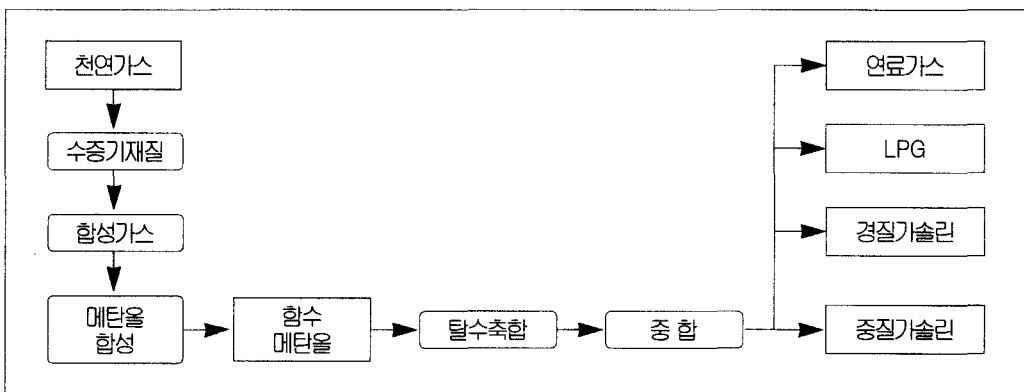
생성물은 원하는 최종생산물만이 아닌 광범위한 조성분포를 갖기 때문에 수소첨가 개질 등 2차 가공과정을 거쳐 원하는 제품을 생산한다. FT 합성이 관련된 액화공정의 총괄 에너지효율은 Shell사 60% 이상(그림 4), SASOL사와 EXXON사는 약 65%로 알려져 있다.

이 방법은 합성가스 제조반응을 생략함에 따라 에너지 절감효과가 클 것으로 보이나 촉매재료를 포함하여 공정개발 단계에 있으며 현 시점에서는 만족할 만한 성과는 없는 것으로 알려지고 있다. 주요 공정은 다음과 같다.

많은 연구가 진행중이며 메탄(CH<sub>4</sub>)을 에탄(CH<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub>), 에틸렌(CH<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub>)으로 변환하는 산화커플링반응과 여기에 덧붙여 액체탄화수소화 중합반응을 행한다.

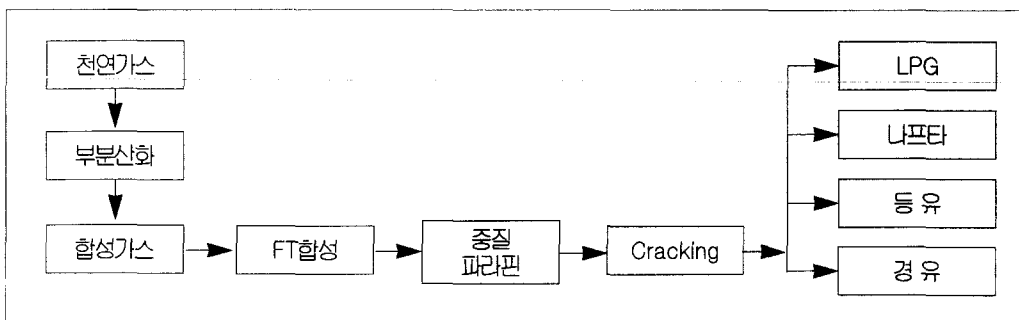


전단의 반응은 Li-MgO 계 혹은 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 계 등 촉매를 사용하여 800℃, 4기압의 반응



〈그림 3〉 Mobil MTG 공정 개략도

## 특집 자동차 연료 및 윤활유



〈그림 4〉 SHELL SMDS 공정 개념도

조건에서 메탄전환율 30%, C2 선택율 80%를 얻었다. 후단반응에서는 제올라이트계 촉매를 써서 400℃, 4기압의 조건에서 가솔린 수율 80%를 얻었다. 후단반응에서는 실용화가 가능한 정도의 수율에 도달하였지만 전단반응에 있어서는 C2의 수율은 24%로 낮아서 경제성이 없어 전단반응이 경제적 수준까지 가기에는 오랜 기간이 필요할 것이다.

### 2.4.2 Oxymethylation (OMC)법

미국 DOE의 FETC에서 Dow Corning, GRI 등과 함께 개발한 공정으로 메탄을 염화물 촉매(CuCl<sub>2</sub>, KCl, LaCl<sub>3</sub> 등)를 사용하여 16기압, 340℃에서 산소 및 염산과 반응시켜, Methyl Chloride을 제조하며 이를 ZSM-5계 제올라이트로 가솔린으로 전환한다. 메탄 전환율은 99%로 현저히 높으며 염산은 재생하여 반응계로 재순환시킨다. 그렇지만 강산성 분위기 반응 조건이므로 장치 재료의 제약이 있고 최종 생성물 중에는 수퍼센트대의 염소화합물이 혼재되어 있다는 단점 때문에 연구가 중단된 것으로 알려져 있다.

### 2.4.3 부분산화법

메탄을 산소로 직접 산화하여 메탄올과 포름알데히드 등 합산산화합물을 생성시켜 이것을 반응 중간체로 하여 액체연료를 제조하는 방법이다. 전단의 반

응은 부분산화반응이라 할 수 있으며 메탄과 산소 공존하에서 350~500℃, 약 60기압에서 반응을 진행한다. 이산화탄소 등의 부산물을 억제하기 위해서는 저온, 10% 이하의 저산소 분위기하에서 반응을 행하는 것이 필요하다. 촉매로는 MoO<sub>3</sub>계 등이 사용되고 있다. 반응제어가 어렵고 반응수율이 수퍼센트에 불과하므로 본격적 실용화 검토단계에는 이르지 못한 실정이다. 후단에서는 부분산화 공정후에 MTG 공정을 연결하여 메탄올을 가솔린으로 변환하게 된다.

### 2.5 기타 연구 동향

프랑스 석유연구소(IFP)에서도 천연가스로부터 가솔린과 디젤연료를 제조하는 기술을 연구중인데 공정 자체는 아직 개념설계 단계에 있다. 또한, 호주 CSIRO는 IFP 공정과 유사한 OXCO 공정을 개발하여 벤치스케일까지의 기술이 축적되어 있다. 그러나 연구내용은 아직 발표하지 않고 있다. 미국 EXXON사는 유동층식 천연가스 개질과 슬러리법 FT 합성을 조합시켜 천연가스로부터 고품질의 디젤연료 혹은 제트연료 등의 생산기술을 확립하였다. 미국의 벤처기업인 Syntroleum은 천연가스의 부분산화에 의한 합성가스화와 FT 합성을 이용한 액체연료화 공정을 개발하여 TEXACO, ARCO 등 석유 메이저와의 연대 외에도 ENRON과 같은 천연가스

메이커와도 플랜트 건설 계약을 체결하는 등 활발한 활동을 하고 있어 주목받고 있다. 노르웨이의 STATOIL은 천연가스 개질, 슬러리법에 의한 FT 합성 및 수소화 분해기술을 가지고 있으며 덴마크의 TOPSO사는 합성가스로부터 메탄올을 거쳐 가솔린으로 변환시키는 공정을 개발하여 1톤/일의 파일롯 플랜트를 운전하고 있다. 일본의 경우는 동경대, 물질공학공업기술연구소, 환경기술 총합연구소 등이 대표적인 연구기관이며 주로 천연가스를 효율적으로 액체연료로 전환하는 기술에 관한 촉매와 반응에 관한 기초연구이다. 산업체 쪽에서는 일본석유공단이 1990년부터 천연가스 산화 커플링 반응을 이용한 가솔린합성을 진행하여 왔으나 C2화합물의 수율이 약 15%로 예상보다 낮아 파일롯 플랜트 (1배럴/일 계획)의 건설에는 이르지 못한채 1996연도에 연구 개발을 종료하였다. 또한 미츠비시중공·코스모석유에서도 합성가스로부터 디메틸에테르를 거쳐 가솔린을 합성하는 1배럴/일의 벤치스케일 플랜트를 운전하였지만 공업화에는 이르지 못하였다.

우리나라에서도 대학과 연구소를 중심으로 1980년대부터 FT 또는 MTG 촉매 및 반응에 대하여 일부 기초연구결과가 발표<sup>(5,6,7)</sup>되고 있으나, 아직 규모 면에서는 실험실적 수준에서 벗어나지 못하고 있다. 또한 석탄의 직접액화에 대한 연구는 한국에너지기술연구원에서 기초 및 벤치스케일 단계의 실험을 수행한 바 있다<sup>(8,9)</sup>.

### 3. 향후 전망 및 결론

석탄 혹은 천연가스를 원료로 한 액체연료의 합성 기술은 상업생산이 진행될 정도로 확립되어 <표 1>에 보인 바와 같이 이미 4사의 상용공장이 가동중이며 하루 20만배럴 수준을 넘어섰다. 상용화된 공정은 모두 합성가스를 경유하는 간접액화법이며 합성가스의 액체연료화 반응에는 FT 합성반응이 주로 이용되고 있는데, 총괄효율은 65%로 거의 한계에 달하고 있다. 효율향상에 대한 기대로 직접액화법에 관한 연구가 최근 활발하지만 반응수율과 반응조건

<표 1> 각 기업의 생산 현황과 계획

기업명	원료 및 공정	상 황	생산능력, 배럴/일		장래 증설 계획
			가솔린	경 유	
SASOL	석탄, FT합성	조업중	150,000		- Chevron과 공동으로 나이지리아 GTL 프로젝트 참여(2003년 운전개시 예정, 3만B/D 규모) - 카타르 지역 검토중*1
NASF	천연가스, Mobil법	조업중	14,500		
MossGas	천연가스, FT합성	조업중	45,000		- 7만톤 규모 신설 (2002년 3/4 분기 예정)*2
Shell	천연가스, FT합성	조업중	12,500		장래 50,000으로 증설
EXXON	천연가스, FT합성			10,000	
TEXACO	천연가스, FT합성	1999-	2,500		125000-150000
ARCO	천연가스, FT합성	?	수만		
ENRON	천연가스, FT합성	2001-	8,000		

\*1 <http://www.sasol.com>

\*2 <http://www.graphicor.co.za/selfnewz/mossgas>

## 특집 자동차 연료 및 윤활유

등에 해결해야 할 과제가 산적해 있어 실용화에는 상당한 기간이 필요한 것으로 보인다. 원료로는 SASOL사를 제외하고 천연가스를 대상으로 하고 있는데 원격지에서의 새로운 천연가스전의 발견 속도가 이들 가스를 개발하여 시장에 내놓을 수 있는 산업체의 능력을 앞지르고 있으며 석유 채굴중 가스의 Flaring/Venting을 줄이라는 정치적 압력이 늘어나고 있기 때문에 생산된 가스의 GTL 공정에 대한 관심이 증대되고 있다.

합성연료의 보급을 저해하는 최대 요인은 가격이다. 1989년 Fox<sup>(10)</sup>가 발표한 자료에 따르면 간접액화공정에서는 37~40\$/BBL, 직접액화공정으로는 44~57\$에 이른다. 직접액화법이 더 높은 비용이 드는 원인은 간접법에 비하여 총합반응효율이 낮다는 것이 주요인이다. 투자비 등을 고려한다면 전통적인 GTL 전환공정은 원유가격이 US\$30~35/bbl이 되어야 경쟁력이 있을 것이나 SASOL은 FT축매에 기초한 고허성 코발트축매 개발로 단위반응기부피당 전환율을 높여 원유가 US\$20/bbl일 때에도 경제성을 갖추는 것을 목표로 하고 있다. 투자비는 Gas-Oil 생산목적이라면 각 GTL공정(간접법)별 차이가 크지 않으며, 규모 20,000~100,000 bbl/d 범위에서는 26,300~14,200 US\$/d·bbl 인 것으로 발표되고 있다.<sup>(11)</sup> 최근 제조코스트에 대한 업체 측의 자료는 SASOL사가 \$24/bbl, EXXON사 \$20~21/bbl, MossGas \$28/bbl, Syntroleum사는 \$22.7/bbl로서 Fox가 발표한 가격에 비하여 30~40% 정도 낮았는데 공정효율 향상, 플랜트 설계의 최적화 등에 노력한 성과로 보인다<sup>(4)</sup>. 이 정도의 가격이라면 천연가스가격이 0.5\$/MMBTU 이하, 원유

가격이 배럴당 25\$ 수준 이상으로 유지된다면, 합성연료의 청정성을 고려하여 충분히 석유와 경쟁할 수 있을 것이다.

### 〈참고문헌〉

- 1) 김종원, 심규성: 한국수소에너지학회지, 7(2) 193, 1996
- 2) D.A.Fickman and L.D.Schmidt: Catalytic Letter, 17, 223, 1993
- 3) V.R.Choudhary et al.: Journal of Catalyst, 139, 326, 1993
- 4) 高效率クリーンエネルギー 自動車の 研究開発成果報告書, 新エネルギー産業技術総合開発機構, 日本自動車研究所, 1998.3
- 5) 최기섭, 김경림: 화학공학, 20(4), 231, 1982
- 6) 유승호, 송재천, 이화영: 화학공학, 27(4) 489, 1989
- 7) 설용건, 타츠미 타카시, 히로오 토미나가: 화학공학, 28(3), 288, 1988
- 8) 윤왕래 외 : 한국화학공학회 추계 학술발표회, 1994
- 9) Kim, J.W., S.B. Lalvani, C.B. Muchmore, B.A. Akash: Energy Sources, 21:839-847, 1999
- 10) J.M.Fox, T.P.Chen and B.D.Degen: Proceedings of the AIChE 1989 Spring National Meeting in Houston, 1989
- 11) J.van Berge, S.Barradas, E.A.Caricato, B.H.Sigwebela and J. van de Loosdrecht: in Worldwide Catalyst Industry Conference, Houston, Texas, USA, June 12-13, 2000

〈김종원 센터장 : jwkim@kier.re.kr〉