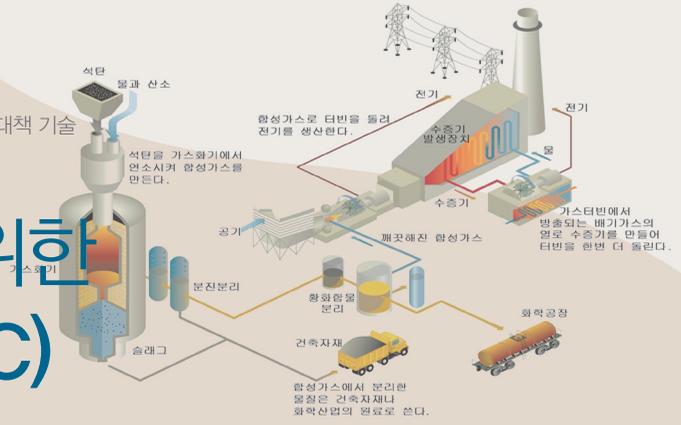


# 친환경 석탄이용을 위한 가스화복합발전(IGCC) 기술

서 동 균 | 청정발전연구소/선임연구원



## 1. 서 론

그 동안 석탄은 대표적인 발전 연료로서 인류의 발전에 크게 기여해왔다. 그러나 최근에 지구 온난화와 같은 글로벌 이슈가 크게 대두됨에 따라서 대표적인 이산화탄소 배출 설비로 알려진 석탄발전에 대한 인식이 크게 악화되고 있다. 특히 국내의 경우 얼마 전부터 공기 중 미세먼지가 크게 이슈화됨에 따라 석탄발전에 대한 부정적 인식이 더욱 더 가중되고 있다. 그러면 더 이상 석탄은 발전 연료로 쓸 수 없는 연료인가? 그렇지 않다. 석유 한 방울 나지 않는 나라인 우리나라에게 적어도 앞으로 상당 기간 동안 석탄은 이용되어야 할 연료이다. 다만 그동안 간과되었던 환경적 측면을 강화한 석탄 이용기술이 필요하다. 본고에서는 석탄을 친환경적으로 이용할 수 있는 석탄가스화 기술에 대해서 알아보고, 이를 발전에 적용하는 IGCC 기술에 대해서 주로 살펴보고자 한다.

### 제 1 장 석탄가스화 기술

석탄가스화(Coal Gasification)란 원료인 석탄을 고열로 기체화 하여 합성가스를 만드는 기술이다[1]. 이렇게 얻은 합성가스는 후단공정에 따라서 다양한 에너지 형태의 생산물을 얻을 수 있다. 또한 가스화기에 투입되는 연료로는 석탄 외에도 바이오매스(Biomass), 폐기물과 같은 일종의 고체연료도 비슷한 메커니즘을 통해서 합성가스를 생산한다. 공업적으로 모든 고체연료는 크게 수분, 휘발성물질(volatile matter), 좌

(char), 재(ash)로 구분된다. 가스화를 위해서는 노내에 어느 정도의 고온조건이 필요한데, 이를 위해 석탄이 산소와 부분 연소(partial oxidation)되어 어느 수준의 반응열을 발생시켜야 한다. 이렇게 얻은 반응열은 고온의 조건을 만들고, 이러한 고온조건에서 먼저 수분이 증발한다. 이어서 탄화수소(CxHy)로 구성된 휘발성 물질이 탈휘발화(devolatilization) 된다. 탈휘발화된 후 남은 탄소덩어리인 좌는 최종적으로 이산화탄소와 수분과 반응하여 좌가스화(char gasification)하여 대부분의 수소와 일산화탄소로 구성된 합성가스를 생산한다. 특히 좌가스화는 고상물질인 좌와 기상물질인 수분과 이산화탄소의 반응으로서 반응속도가 가장 늦으면서 반응기 설계에 가장 큰 영향을 끼친다. 그림 1은 석탄가스화기 내에서 일어나는 가스화 현상을 잘 나타낸 그림이다.

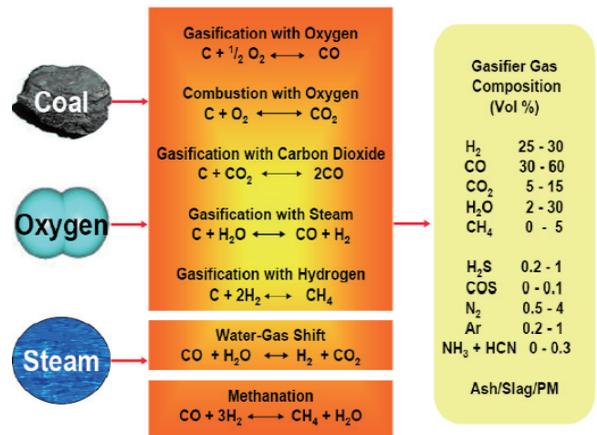


그림 1. 석탄가스화의 원리

## 제 2 장 석탄가스화복합발전(IGCC)

1장의 석탄가스화 기술을 발전분야에 응용한 기술이 석탄가스화복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle)이다. 전통적인 석탄발전은 상압의 보일러에 100 $\mu$ m내로 미분화된(Pulverized) 석탄을 공기와 함께 완전 연소시켜서 발전하는 방식이다. 이 때 고온의 보일러에 물을 통과시켜서 고온 고압의 증기를 얻은 후, 이 증기가 터빈을 구동함으로 전력을 발생시킨다. 이에 반하여 IGCC는 석탄가스화를 통해서 얻은 합성가스를 가지고 가스발전과 증기 발전을 복합(combined)으로 발전하는 특징을 가지고 있다. 여기서 가스발전이란 합성가스를 가스터빈에서 연소시킴으로 1차 전력을 얻는 것이고, 증기발전은 가스터빈에서 나오는 배기가스를 배열회수보일러(Heat Recovery Steam Generator)에 통과시켜 스팀을 얻어서 2차 전력을 얻는 것이다. 특히 IGCC는 가스화기에서 나오는 황화수소(H<sub>2</sub>S)와 같

은 산성가스를 제거해야 하는데 이는 산가스제거장치를 통해 제거할 수 있다. 그림 2는 이러한 IGCC의 개요도이다.

## 제 3 장 IGCC 기술의 특징

이러한 IGCC 기술은 기존 석탄 화력과 구별된 몇 가지 특징을 지니고 있다. 첫째, IGCC의 환경성이다. IGCC는 석탄의 미세먼지의 근원인 재(ash) 성분 70%를 가스화 단계에서 슬래깅 상태로 가스화기 아래로 배출시킬 수 있다. 합성가스와 함께 실려 가는 30%의 재도 필터(filtration) 혹은 스크러버(scrubber) 기술을 통해서 전처리적으로 완벽한 제거가 가능하다. 이와 같은 몇 겹의 필터링 방식은 IGCC가 석탄을 이용하지만 미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있는 중요기술이다. 대표적인 전구물질로 알려진 황산화물이나 질소산화물의 배출도 IGCC에서는 거의 가스발전급으로 정제가 가능한 특징을 가지고 있다. 표 1은 다양

한 발전원에 대한 오염물질 배출농도를 나타낸 것으로서 IGCC의 배출물의 수준이 매우 우수함을 알 수 있다. 특히 HRSG 내에 탈질설비를 추가 설치 시 질소산화물도 5 ppm 미만으로 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.

둘째, IGCC의 고효율 발전이다. IGCC는 석탄을 이용하지만 가스발전과 같이 복합발전 방식을 가지고 있다. 이러한 복합발전의 효율은 가스터빈의 효율이 증가함에 따라 증가하는데 가스터빈 기술이 지속적으로 발달하기 때문에 IGCC 효율도 지속적으로 오를 것으로

예상된다. 현재 국내에서 운영되고 있는 서부발전의 태안 IGCC의 효율은 약 42%이다. 향후 가스터빈 급에 따라 IGCC는 최대 57%까지 효율이 증가하는 것으로 알려져 있고, 여기에 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)가 붙으면 효율이 최대 60% 이상까지 도달할 것으로 예측하고 있다[2].

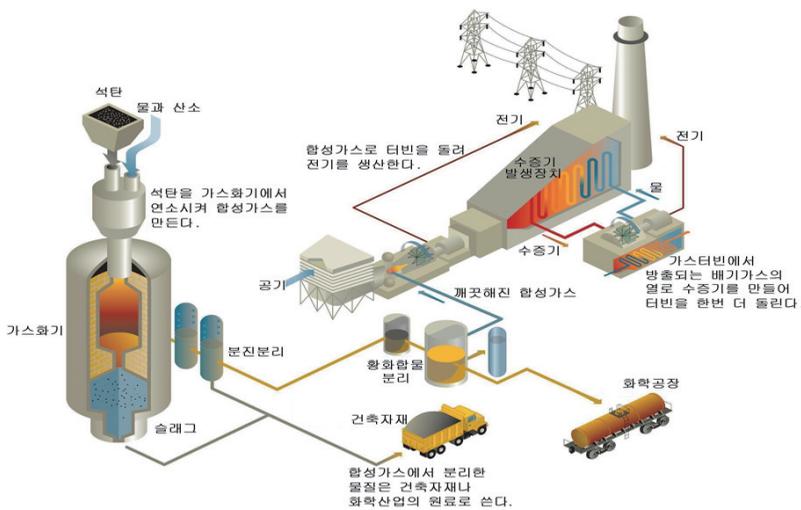


그림 2. IGCC 개요도

표 1. 다양한 발전원의 오염물질

| 구분                              | 석탄  |         | 오일     | 가스    | 바이오 | IGCC     |    |
|---------------------------------|-----|---------|--------|-------|-----|----------|----|
|                                 | 유연탄 | 무연탄     |        |       |     |          |    |
| SOx(ppm)                        | 평균  | 36.2    | 64.3   | 19    | -   | -        | <1 |
|                                 | 범위  | 25~85   | 43~85  | 17~22 | -   | -        |    |
| NOx(ppm)                        | 평균  | 63.1    | 106.8  | 39.5  | 6.5 | -        | 27 |
|                                 | 범위  | 11~98   | 46~172 | 24~56 | 6~7 | -        |    |
| 총먼지(mg/m <sup>3</sup> )         | 평균  | 6.5     | 5.8    | 5.0   | -   | 2.6(유동층) | <1 |
|                                 | 범위  | 3~7     | 5~7    | 3~6   | -   | 1.5~4.3  |    |
| 미세먼지(PM10)(mg/m <sup>3</sup> )  | 평균  | 1.8     | -      | -     | -   | 2.2(유동층) |    |
|                                 | 범위  | 1~4     | -      | -     | -   | 1.3~3.3  |    |
| 미세먼지(PM2.5)(mg/m <sup>3</sup> ) | 평균  | 0.4     | -      | -     | -   | 1.5(유동층) |    |
|                                 | 범위  | 0.1~0.6 | -      | -     | -   | 1.1~2.2  |    |

셋째, IGCC는 CCS(Carbon Capture and Storage) 기술 혹은 CCU (Carbon Capture and Utilization) 기술과의 연계가 유리한 기술이다. IGCC 운영을 위해 가스화기에서 나오는 합성가스를 정제해야 하는데, 합성가스가 정제과정(Acid Gas Removal)을 거치면서 이산화탄소를 용이하게 포집할 수 있는 장점을 가지고 있다. 현재의 IGCC는 이산화탄소 중 일부만 포집하지만 미래에 수소터빈이 개발되면 100% 이산화탄소 포집이 가능하게 하는 잠재력을 가지고 있다. 이러한 포집이 용이한 IGCC가 CCS/CCU 기술들과 연계될 때 이산화탄소 저장 및 이용을 크게 도울 것이다.

넷째, IGCC는 향후 가스화 폴리제너레이션(Poly-Generation) 기술 개발의 디딤돌 역할을 할 수 있다. 석탄가스화 기술은 앞서의 발전 분야 뿐 아니라 오일, 가스 등 다양한 고부가가치를 지닌 최종생산물물을 제공할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다(그림 3). 이를 가스화 폴리제너레이션이라고 하는데, 이는 중간생성물인 합성가스로 다양한 생산물을 만들 수 있는 특징을 가지고 있다. 그림 4는 석탄가스화를 통하여 구현할 수 있는 최종생산물 및 그것의 단위 에너지당(석탄 1톤당) 가격을 보여주고 있다. 국내 석탄가스화 기술은 IGCC와 같은 발전에 초점이 맞추어져 있으나, 부가가치 관점에서 볼 때 메탄올과 같은 오일이나 암모니아와 같은 케미컬이 생산이 훨씬 유리하다. 실제로 전 세계적으로 석탄가스화 플랜트가 가장 많이 가동되고 있는 중국의 경우, 대부분의 가스화 플랜트의 용도는 케미컬에 집중되어 있다. 이와 같이 가스화 폴리제너레이션 기술은 때(time)와 장소(place)의 시장의 요구에 따라서 생산물이 얼마든지 바뀌게 할 수 있는 큰 유연성을 가지고 있다. 이와 같은 기술은 전력 외에 중앙 공급이 어려운 다양한 형태의 에너지를 자립해야 하는 소규모 공동체에 에너지 공급 플랫폼으로 활용될 수 있다.

마지막으로 IGCC는 통일 시대에 북한의 풍부한 석탄을 이용할 수 있는 기술이다. 북한은 1차 에너지 공급구성이 70%를 차지할 만큼 풍부한 석탄을 매장하고 있어서, 자체 석탄 가스화 기술을 통하여 비료 뿐 아니라 IGCC 전단계라고 할 수 있는 UCG(Underground Coal Gasification)로 전력으로 생산하는 것으로 알려져 있다[5]. 북한의 풍부한 석탄과 남한의 석탄가스화 및 IGCC 기술 매개한 교류는 통일 시대를 좀 더 앞당길 수 있는 전략이 될 수 있을 것이다.

#### 제 4 장 IGCC 국내의 현황

미국과 유럽은 IGCC의 핵심기술의 원조 보유국으로서 관

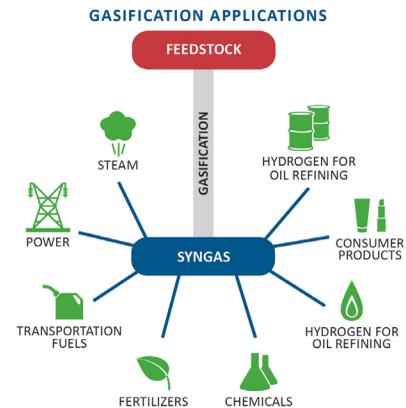


그림 3. 가스화 폴리제너레이션[3]

| Gasification                 | Product/Volume/Prices*                              | Revenue / t of coal |
|------------------------------|---|---------------------|
| 1 t coal (sub-bituminous)    | 1,600 Nm <sup>3</sup> Syngas (CO + H <sub>2</sub> ) |                     |
|                              | 420 Nm <sup>3</sup> SNG** (@ 3.5 USD/mmBtu)         | 50 USD              |
|                              | 2.4 MWh <sub>th</sub> Power (@ 60 USD/MWh)          | 145 USD             |
|                              | 420 Nm <sup>3</sup> SNG** (@ 15 USD/mmBtu)          | 225 USD             |
|                              | 0.19 t Polypropylene (@ 1,580 USD/t)                | 300 USD             |
|                              | 0.72 t Methanol (@ 450 USD/t)                       | 325 USD             |
|                              | 95 gal Gasoline (@ 3.5 USD/gal)                     | 330 USD             |
| 0.98 t Ammonia (@ 450 USD/t) | 485 USD   |                     |

그림 4. 석탄가스화 부가가치[4]

련기술 및 사업개발을 견인해왔다. 미국은 습식 중심의 기술로서 Texaco 및 CB&I社 등이 기술개발을 주도해 왔다. 유럽은 건식 중심의 기술로서 Shell사(현 Air Liquid사) 및 Uhde 사(현 TKIS사) 등이 주도해왔다. 그러나 미국은 저렴한 셰일 가스의 풍부한 공급으로 인해, 유럽은 IGCC가 신재생에너지에 분류되지 않음으로 인해 기술 개발의 동력이 크게 감소되었다. 석탄이 1차 소비 에너지의 62% 이상을 차지하고 있는 중국은 오래 전부터 석탄가스화 기술 개발에 진력해 왔다. '15년 말 현재 중국은 655기의 석탄가스화기를 보유하고 있으며, 최근에 건설되고 되고 있는 대부분의 가스화기가 중국에 세워지고 있다[6]. 초기에 중국은 미국 및 유럽 공정으로 자국 내에 가스화기를 세우다가 차츰 ECOUST, TPRI 공정과 같은 자국에서 독자 개발한 가스화기 기술로 대체하고 있다. 중국의 IGCC 건설은 현재는 단 1기(華電 IGCC)에 불과한데, 이는 석탄가스화의 중간생성물인 합성가스의 수요가 전기(IGCC)보다 메탄올, 대체합성가스(SNG), 암모니아 등에 더욱 높기 때문이다. 최근 중국은 발전영역에서도 환경성을 의식하지 않

을 수 없기 때문에 향후 중국 내 IGCC에 대한 수요는 점차로 증가될 것으로 예상된다. 일본은 IGCC의 기술개발과 상용화에 가장 적극적인 국가이다. 일본의 IGCC는 산화제에 따라 크게 두 가지 방식으로 구분할 수 있는데, 순산소를 사용하는 OSAKI CoolGen(Gross 170MW급)플랜트와 공기로 사용하는 Nakoso IGCC(Gross 250MW급)로 구분할 수 있다. 특히 공기형의 경우, 2021년에 운전을 목표로 후쿠시마 지역에 540MW급 IGCC 2기를 건설 중에 있다.

국내는 서부발전이 태안에 300MW급 실증플랜트를 16년 8월에 준공하였고 17년 10월에 실증운전을 완료하였다. 준공 이후 초기에 운영에 많은 어려움 있었으나 18년 4월 현재 이용률이 80% 이상을 상회할 정도로 운전 정상화에 도달하였다. 미세먼지 등의 배출물도 가스발전 수준으로서 친환경 기술로 입증하고 있다. 한전은 2009년에 IGCC 기술 확보를 위해 핵심 기술인 가스화기술을 독일의 Uhde社로부터 도입하기 위해 캡코우데사를 설립하였다('11.7.). 현재 한전, 동서발전 등이 컨소시엄을 구성하여 도입기술로 남해에 Gross 430MW급 IGCC 사업을 추진 중에 있다. 남해 IGCC 사업은 '17년 말에 8차 전력수급계획에 반영되었고 현재는 한국전력기술이 용역사로서 본타당성 용역('17.8~18.7)을 수행 중에 있다.

## 2. 결 론

최근 미세먼지 등의 환경적 이슈로 인해서 석탄에 대한 부정적인 인식이 가중되고 있다. 재생에너지가 유력한 대안이

지만 아직 미미한 수준의 발전량을 고려할 때 기존의 대표적 발전원인 석탄 연료는 현실적으로 고려할 수밖에 없는 옵션이다. 친환경 고효율 IGCC는 석탄을 이용하면서 기존의 석탄화력의 환경적 문제를 해결할 수 있는 거의 유일한 대안이라고 할 수 있다. 또한 통일시대에 북한의 풍부한 석탄을 고려할 때 IGCC와 같은 석탄이용기술에 대한 관심이 더욱 필요할 것이다. 

### 참고문헌

- [1] [http://ko.m.wikipedia.org/wiki/석탄\\_가스화](http://ko.m.wikipedia.org/wiki/석탄_가스화)
- [2] Tsuchiya, Munehico, "Development of Coal Gasification Technology in Japan", 7th CCT&FC Workshop in Japan, 2011
- [3] Kerester, Alison, "Gasification can help meet the world's growing demand for cleaner energy and products", Corner Stone, 2014
- [4] Morehead, Harry, "Siemens Gasification: Progress and Innovation", Gasification Technologies Conference 2013 October
- [5] NK 투데이, "북한의 지하자원", NK 투데이, 2014년 3월 3일, 2014
- [6] Wang, Shoujian. "Development and Application of Modern Coal Gasification Technology", Chemical Industry and Engineering Process, 35(3), pp653~664, 2016

표 2. 국외 IGCC 현황

| 구분                 | 국가   | 용량 (MW) | 가스화 공정사 | 가스 화기     | 가스 터빈 | 운전기간               | 효율(%) HHV기준               |
|--------------------|------|---------|---------|-----------|-------|--------------------|---------------------------|
| Buggenum           | 네덜란드 | 253     | Shell   | 건식        | 지멘스   | 1994~2014년         | 41.4                      |
| Wabash River       | 미국   | 262     | CB&I    | 습식 2단     | GE    | 1995년~             | 39.7                      |
| Tampa              | 미국   | 250     | GE      | 습식        | GE    | 1996년~             | 36.5                      |
| Puertollano        | 스페인  | 300     | Uhde    | 건식        | 지멘스   | 1997~2015년         | 41.5                      |
| Nakoso             | 일본   | 250     | MHPS    | 습식        | MHPS  | 2007년~             | 40.5                      |
| Edwardsport        | 미국   | 618     | GE      | 습식        | GE    | 2013년~             | 37.9                      |
| Kemper County      | 미국   | 524     | TRIG    | 유동층       | 지멘스   | 2014.08~           | 29.0 (CO <sub>2</sub> 포집) |
| Osaki CoolGen      | 일본   | 166     | MHPS    | 건식 2단(산소) | MHPS  | 2017.04~           | 40.5                      |
| Fukushima (Nakoso) | 일본   | 540     | MHPS    | 건식 2단(공기) | MHPS  | '16년 착공<br>'21년 준공 | 45.8                      |
| Fukushima (Hirono) | 일본   | 540     | MHPS    | 건식 2단(공기) | MHPS  |                    |                           |