

# CFBG 바이오매스/폐기물 가스화 기술

군산대학교 재료화학공학부 교수 송병호

## 1. 기술개요

주입되는 연료 형태에 유연성이 매우 좋은 순환유동층을 이용하여 바이오매스, 석탄, RDF를 주 연료로 하고 하수슬러지, 플라스틱 등의 쓰레기를 동시에 처리하여 저열량 연료가스를 생산하는 기술이다.

### ○ 기술의 특징

가스화는 석탄/바이오매스/폐기물 등의 풍부한 원료를 CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>로 이루어진 가스 혼합물로 변환시키는 기술로 연료가스나 수소에너지를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 CO<sub>2</sub> 배출을 감축시킬 수 있으므로 소각에 비해 유리하다. 이러한 가스화 공정 역시 대형화가 필요하므로 CFB 기술이 적용될 수 있다. CFB 연소기술을 통해 알려진 장점들이 모두 가스화에 적용된다. 연료수용의 다양성과 반응기의 균일한 온도, 점착성이 강한 물질인 경우에도 응집을 억제할 수 있는 성질, 반응기내에서 탈황이 가능한점, 그리고 중금속 등의 오염물 배출이 적다는 점들이 돋보인다. 물론 이 기술이 적용되기 위해서는 타르의 분해, 고온가스의 세척, 고체잔류물의 처리 기술이 특별한 응용에 맞추어 개발되어야 한다.

CFBG (circulating fluid bed gasifier) 시스템은 아주 간단하다. 본체반응기에서 가스화반응이 일어나고 사이클론 하나가 가스로부터 순환되는 충물질을 분리하여 return pipe를 통해 가스화반응기의 하부로 귀환된다. 상기 구성성분들은 모두 내화벽돌 처리한다. 사이클론을 빠져나온 뜨거운 생성가스는 사이클론 하부에 위치한 공기예열기를 통과하여 흐른다. 고압의 공기팬으로 생성되는 가스화 공기는 공기분산 격자를 통하여 반응기 하부로 주입된다. 이 가스화 기체는 충분히 유속이 높아서 충입자들을 유동화시키며, 이 단계에서 고체 층은 확장되어 모든 입자들이 매우 빠르게 움직이게 된다. 기체의 유속은 높아서 많은 충 입자들은 반응기 밖으로 나가고 사이클론으로 향한다. 사이클론에서는 기체와 고체가 같은 방향 즉 아래쪽으로 움직이다가 사이클론 하부에서 별도로 분리된다 (Fig. 1). 연료는 가스화기의 하부에서 주입된다. 바이오연료인 경우에는 보통 20 - 60 % 수분이고, 연소분은 40 - 80 %, 회분이 1 - 2 % 정도이다. 조업온도는 연료에 따라 보통 800 - 1000 °C를 유지한다. 연료가 일단 주입되면 급격히 건조되면서 열분해가 일어난다 이 때 연료는 가스, 타르가 빠져나가고 찌꺼기 된다. 찌꺼기의 일부는 반응기 하부로 흐르면서 연소되면서 CO/CO<sub>2</sub>를 낸다. 앞서 말한 생성물들은 반응기 위로 흐르면서 2차적인 반응들이 일어난다. 이 반응들은 찌꺼기 참여하는 불균일반응이 일어나고 한편 가스상 물질들만 서로 반응하는 균일반응이 일어난다. 이러한 일련의 반응들을 통하여 가연성의 연료가스가 생성되는데

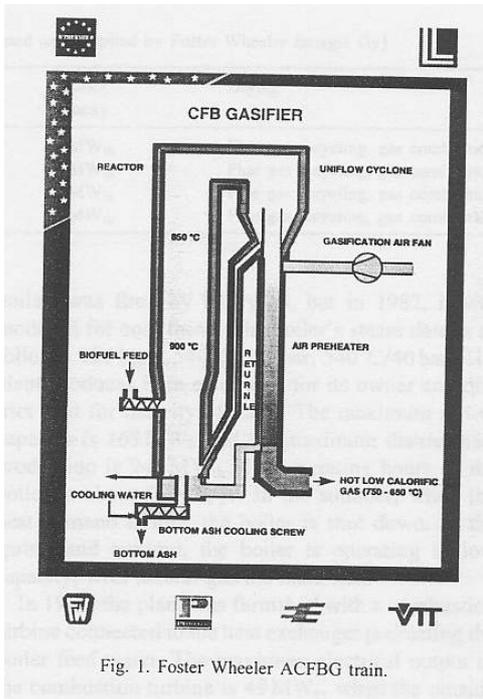


Fig. 1. Foster Wheeler ACFBG train.

싸이클론을 지나 약간의 미세분들과 함께 시스템을 빠져나간다. 대부분의 고체입자들은 싸이클론에서 분리되어 가스화기의 하부로 되돌아간다. 이 고체들에 포함된 찌는 유동화 공기와 접촉하여 연소되기도 하여서 상기한 가스화반응에 필요한 열을 공급한다. 순환되는 고체들은 하나의 열매체로 작용하여 공정의 온도를 안정화시킨다. 굵은 회재는 가스화기의 하부에 축적되어서 냉각장치가 되어있는 bottom ash screw를 통해 총 하부로 제거된다. 정상적인 조업에서는 연료의 주입량이 가스화기의 용량을 정의하게 되며 공기의 주입량은 가스화기의 온도를 조절하게 된다.

Biomass나 석탄에 폐기물을 섞어서 고온에서 수증기와 반응시키면 값싸고 깨끗한 연소용 연료가스를 생산할 수 있다. 가스화는 원료내의 탄소분을 CO+H<sub>2</sub> 혼합물로 변환하는 흡열반응이므로 이에 소

요되는 열은 탄소를 부분산화시켜서 공급한다. 슬러지와 같이 탄소함량이 부족한 원료일 경우에는 석탄을 보조연료로 사용한다. 부분산화로 생성되는 CO<sub>2</sub> 양은 소각의 경우에 비해 미미하며, 공급가스중의 과잉수증기 혹은 수성가스변환반응(water gas shift reaction)으로 인해 생성가스 중에 H<sub>2</sub>O가 포함되므로 생성가스의 주요성분은 H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>가 된다. 이외에 원료의 초기 열분해 과정에서 CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, COS, NH<sub>3</sub>가 소량 생성될 수 있다. 폐기물내 수은을 제외한 중금속은 고체잔류물에 안전하게 잡아 놓을 수 있다.

## ○ 타산업과의 연계 및 타산업에 미치는 영향

폐기물 소각로 시장에 영향을 줄 수 있다. 폐기물 처리시장에는 최근 들어 소각 중에 dioxin이 발생하는 것을 원천적으로 억제하기 위하여 400 - 600 °C에서 열분해 및 가스화를 우선 수행하고 생성되는 연료가스를 이용하여 찌 및 회분을 1300°C 이상으로 가열 용융시켜 슬래그로 만들어 처리하는 가스화용융 방식의 처리공정이 대두되고 있다. 이 중 가스화쪽을 BFB에서 수행하는 공정도 있으나, 이를 CFB로 대체하는 방안도 고려해 볼 수 있겠다.

## 2. 선진외국의 해당분야 산업동향 및 전망

### ○ 시대별 기술동향

Biomass gasification은 2000년 미국의 DOE 에서 21세기 산업체를 위해 필요한 중점기술 중 하나로 선정된 바 있으며, waste gasification 역시 세계적으로 개발 중에 있는 공정[9, 10]이므로 세계적인 추세에 동승하여 신기술의 국내 기반기술을 축적하기 위해서는 이에 대한 연구가 필요하다.

Foster Wheeler에서는 상압의 CFB연소 보일러기술에 대한 많은 경험을 바탕으로 1980년 상반기에 상압의 CFBG 기술 (biomass gasification)을 개발하였다. 첫 번째 상용화는 1983년 핀란드의 lime kiln에 들어가는 연료유를 대체하는 35 MWth 용량의 프렌트이었다. 이후 스웨덴에 두 개의 pulp mill 공정에 같은 기술로 27 MWth 가 세워졌고 포르투갈에 역시 mill 공정에 17 MW짜리 CFBG가 건설되었다. 이 프렌트들은 bark나 waste wood로부터 킬른에 들어가는 연료를 생산하고 있으며 일부 가스는 건조공정에 이용되고 있다 (Table 1). 최근 핀란드의 남쪽 도시 Lahti에 열과 전기를 공급하는 Kymijarvi의 발전소에서는 메인 보일러 (240 MWth, 125 kg/sec steam)에 사용되는 석탄 및 천연가스 연료의 약 30%를 근처지역에서 얻을 수 있는 값싼 고체 연료인 biofuels or refuse fuels (Table 2, 3 참조)로 대체하기 위해서 Foster Wheeler와 함께 demonstration project를 수행하였다. 즉, 젖은 biofuels를 직접 가스화하여 생성되는 저열량의 가스를 현재 존재하고 있는 석탄보일러에 사용하는 것이다. 1998 - 1999 년에 걸친 작업은 매우 성공적으로 수행되었다.

Table 1  
Foster Wheeler's ACFBG reference list (note: all of the units were designed and supplied by Foster Wheeler Energia Oy)

Site	Delivery year	Gasifier capacity	Drying
Oy Wisaforest Ab, Pietarsaari, Finland	1983	35 MW <sub>th</sub>	Flue gas recycling, gas combustion
Norrsundet Bruk Ab, Norrsundet, Sweden	1985	27 MW <sub>th</sub>	Flue gas recycling, gas combustion
ASSI, Karlsborgs Bruk, Sweden	1986	27 MW <sub>th</sub>	Flue gas recycling, gas combustion
Portucell, Rodao Mill, Portugal	1986	17 MW <sub>th</sub>	Flue gas recycling, gas combustion

Table 2  
The available local fuels on annual basis in the Lahti area

Fuel	Amount (wt% of total)	Moisture (wt%)
Saw dust	10	45-55
Wood residues (bark, wood chips, wet and fresh wood residues, etc.)	30	45-55
Dry wood residues from the wood working industry (plywood, particleboard, cuttings, etc.)	30	10-20
Recycled Fuel (REF)	30	10-30

Table 3  
The composition of the recycled fuel (REF)

Component	wt%
Plastics	5-15
Paper	20-40
Cardboard	10-30
Wood	30-60

유럽에서 바이오매스 가스화변환을 위한 상용 보일러의 설계, 제작을 하고 있는 회사들은: (1) Foster Wheeler가 1995년에 Alstrom Power의 CFB 보일러 부분을 사들였다. 이들은 biomass gasifiers or mesa kilns을 제작하고 있다. (2) Tampella (핀란드) + Götaverken (스웨덴)는 1990년대에 Kvaerner pulping Co.에 흡수되었다. 이들은 “Enviropower” 라고 하는 개발회사를 가지고 있었으며 pressurized gasifiers for biomass를 제조하였다. 이 회사는 1995년에 문을 닫았으나 직원들은 “Carbona” 라는 회사에 계속 근무하고 있다. (3) TPS, Studsrik (스웨덴)은 바이오매스를 연료로 하는 상압의 gasifier를 제작해오고 있다.

### ○ 기술개발 추진실적 및 성과 (투자규모 포함)

캐나다의 The University of British Columbia 화학공학과에 1996년 정부의 투자로 가스화 생성가스 및 잔류물의 분석장치가 완전하게 갖추어진 1-5 kg/h 가압 CFB 가스화 Pilot plant가 건설되었으며, 석탄을 원료로하여 조업된 바 있다. 이후에 슬러지 등을 취급할 수 있도록 원료공급시스템이 수정되었으며, 여러 가지 쓰레기 즉, 활성화슬러지, 탈색슬러지, 산업공정슬러지 및 페프라스틱의 가스화실험이 수행되어 오고 있다.

최근 독일의 한 프렌트에서 석탄을 보조연료로 사용하거나 하여서 하수슬러지와 페플라스틱을 그대로 반응기에 주입하여 가스화하는 공정이 보고되었다[1]. 영국 Northumbrian Water Ltd. 에서는 EC의 공동프로젝트로 소화되지 않은 하수 슬러지 35,000 톤/년 을 처리할 수 있는 5 MWe 슬러지 가스화 발전프렌트를 건설하고 있다[2]. 850°C 이상의 온도에서 가스화를 한 후 수은의 제거를 위해 활성화탄 필터를 사용하여 가스를 세정한 뒤, 생성된 연료가스를 연소하여 4.5 MWe의 가스터빈을 구동한다. 슬러지의 건조에는 천연가스 대신 가스터빈에서 배출되는 가스를 사용한다. 슬러지내 고형함유율은 건조조건 5%에서 건조후 93%로 설정되었다. 순수효율은 20%이고, 투자비는 2680 ECU/kWe 으로 알려졌다.

미국의 Thermogenics Inc. 에서는 각종 폐기물, 슬러지, 바이오매스로부터 에너지를 회수하여 내부연소기관, 가스엔진, 스팀보일러 등에 직접 공급할 수 있는 가스화시스템의 공정을 개발하여 수요에 따라 시스템을 설계, 건설해 주는 사업을 하고 있다[3]. 이 시스템은

conveyor를 사용한 원료공급부, 하부로 원료가 공급되는 이동층 형식의 가스화기, 전기집진기, tar-oil-water separator등으로 구성되어 있다.

미국의 에너지성 (DOE)에서는 최근 EnerTech Environmental Inc. 와 공동으로 총 연구비 \$ 21 million을 투자하여 유기성 폐기물을 발전용 연료로 변환하여 greenhouse 오염가스를 줄이고자 100 ton/day 용량의 "SlurryCarb" 공정의 process development facility를 건설하는데 합의하였다[4]. 이 공정이 성공적으로 27개월간 조업되면, 곧 상업화 될 예정으로 있다. 이 공정은 하수 슬러지와 고체 폐기물로부터 전형적인 오염물을 화학적으로 제거하며, 원료를 물을 포함한 슬러리 형태로 사용하기 때문에 타 공정에 비해 에너지나 경제적으로 큰 장점이 있다고 주장하고 있다. 이 시스템은 미분탄연소 발전시스템이나 유동층연소 발전시스템에 모두 적용시켜 사용할 수 있으며, 산업체의 세멘트 킬른이나 제지 mill에도 사용할 수 있는 것으로 알려졌다.

1. Anon, "Plastics Recycling Diminishing Returns", *Chem. Eng.*, Dec., pp. 30-33 (1993)
2. [www.nf-2000.org/secure/Ec/S897.htm](http://www.nf-2000.org/secure/Ec/S897.htm)
3. [www.thermogenics.com/waste.html](http://www.thermogenics.com/waste.html)
4. Wep site: [www.fe.doe.gov/techline/tl\\_enertech.html](http://www.fe.doe.gov/techline/tl_enertech.html)

### ○ 산업성장을 및 이용보급실적

1980년대부터 핀란드 및 스웨덴에 biofuel을 연료로 하는 CFB gasifier가 상용 건설되기 시작하였으나 아직까지는 보급실적이 많지 않은 편이다.

### ○ 미래의 산업전망

발전소에서 사용되는 천연가스를 부분적으로 대체할 수 있는 유망한 공정이다. 바이오매스 혹은 RDF 등의 연료 공급 문제가 해결될 경우 더욱 유망하다. 한편 새로운 발전기술인 IGCC 공정에서 주 가스화기로 적용될 경우, 분류층 가스화기에 비해서 에너지효율 측면이나 사용연료의 유연성으로 보아 가압의 순환유동층 가스화기(PCFBG)가 유리할 수 있다. 반응기 공정의 단순함과 사용연료의 다양성으로 장차 유력한 가스화공정으로서 발전해나갈 수 있는 공정임.

### ○ 해당분야 육성전략

관계인력을 양성할 필요가 있으며 부분적으로는 biomass/waste gasification의 관련 연구를 연구프로젝트의 효율적인 운영을 통해 지속적으로 유지한다. 발전소의 천연가스 연료를 대

체할 수 있도록 목표를 설정할 수 있다. CFB 보일러 연소쪽에서 개발된 기술들을 역시 가스화쪽에 사용될 수 있는 부분이 많다. 따라서 CFB pilot plant를 건설하고 운영하면서 필요에 따른 요소기술을 확보한다.

#### ○ 시사점

### 3. 그간의 국내 기술개발 및 이용보급 산업현황

#### ○ 시대별 기술동향

국내에서는 석탄의 가스화반응에 대한 kinetic 연구가 주로 수행되었다. 근래에는 연료의 다양성을 위해 볏짚이나 폐타이어의 가스화 kinetic 연구가 시도되었다. 하수슬러지나 폐프라스틱은 주로 열분해 쪽의 kinetic 연구가 이루어졌다. 가스화반응기에 대한 연구는 주로 BFB (bubbling bed) 혹은 ICFB (internally circulating fluid bed), EB (entrained bed) 형태가 연구되었으며 EB는 IGCC용 주반응기로서 pilot plant 연구가 진행되어왔다. 그러나 CFB (circulating fluid bed) 형태의 가스화기는 국내에서 연구된 바 거의 없는 상황이다. 공정연구는 유일하게 IGCC Entrained bed gasifier 연구가 정부지원하에 수행되었다.

#### ○ 기술개발 추진실적 및 성과분석

##### 1) 국내의 경우

IGCC의 공정개발을 위한 기초연구가 고등기술연구소 등의 컨소시움에서 수년간 연구되어 왔으나 현재까지 pilot scale 연구로 demonstration까지는 도달하지 못하고 있다. ICFB 가스화 반응기에 대한 연구는 KAIST 및 군산대학교에서 수행된 바 있는데, 석탄으로부터 저열량가스 제조를 위한 내경 0.3 m pilot-scale 가스화기에 대한 연구가 시도되었으나 대학교 단독의 연구로 더 이상의 진전이 없었다. 최근 KAIST에서 CFB의 return 부, down draft 부분에서 석탄의 가스화 연구가 시도된 바 있다. 군산대학교에서는 내경 0.15 m의 ICFB에서 폐타이어와 하수슬러지의 가스화 연구가 수행된 바 있다.

#### ○ 관련업체 수 및 산업성장률

현재 국내에는 비록 자체기술은 아니지만 가스화기 관련 업체가 (주)대우건설, (주)효성에바라, 한라산업개발, 동부건설, 포스코건설 등이 있다. 가까운 장래에 환경오염에 대한 규제강화로 인해 특히 쓰레기 소각이 쓰레기 가스화 및 용융 쪽으로 공정형태가 바뀌고 있는 추세이다. 따라서 이러한 환경변화로 인해 CFB 가스화 공정의 개발이 더 필요하며 역시 산업성

장울도 바이오매스 및 쓰레기의 처리 시장으로 인해 크게 기대되고 있다

#### 4. 해당분야 기술개발/보급 및 산업의 성장애로 부문

##### ○ 산업환경부문

특별한 필요성이 대두되지 않았었음. 그러나 근래에는 쓰레기 처리에 대한 환경규제 및 에너지 가격의 인상으로 그 필요성이 크게 대두되고 있음.

##### ○ 인프라부문

연구소/대학/회사 에서 설계기술을 확보하면, 국내 중공업에서 보일러 제작이 가능할 것임. 산학연의 교류가 실제적으로 필요한 부분이고, 특히 관련 고급인력이 많이 회사로 진출할 필요가 있음.

##### ○ 기술개발부문

예를 들면 쓰레기나 바이오매스나 사용하는 경우, 이에 대한 데이터가 전혀 없다는 것이다. 특히 연료내의 유해물질의 fate가 규명되어야 하며, 이를 처리할 수 있는 기술이 함께 개발되어야 한다. 또 바이오매스는 석탄과는 달리 CFB 연소시 하단부의 열교환표면에 많은 침적을 야기하기도 하는 것으로 알려져 이에 대한 연구나 데이터가 필수적이다. 따라서 관련 연구의 전반적인 수준도 함께 올라와 주어야 하겠다. 각종 사용가능한 연료들의 물리화학적 조성에 따른 가스화 성능 테스트가 필요하다. 이를 위해서는 적어도 10 MWth의 CFBG pilot plant가 운영되어야 한다.

##### ○ 이용보급부문

국내 보일러 업체들의 자체기술 확보에 대한 의지가 부족함.

## ○ 설정목표

biomass나 폐기물로부터 값싸고 깨끗한 연료가스를 생산하기 위한 순환유동층가스화 플랜트를 국내 자체 제작하기 위해서는 우선 100 MWth 의 CFBG plant의 설계 및 제작기술을 확보함을 목표로 할 수 있다.

차년도	목표	
1,2	Bench-scale unit 설계 및 조업	바이오매스, 슬러지의 가스화 반응 데이터 확보
3,4	10 MW pilot unit 설계 제작 및 조업	슬러지 공급기 개발 오염물 처리공정 개발
5,6	100 MW process 설계 제작 기술 확보	
7,8,9	100 MWth Demonstration unit 조업	

## ○ 파급효과 (직·간접)

높은 탄소전환율, 열효율, gas efficiency의 CFB 가스화 공정기술이 확보되면, 에너지 절감 효과가 크며, 쓰레기 등의 새로운 대체에너지 자원의 개발이 기대된다. 현재 수입된 석탄의 대부분은 미분탄 연소에 의한 발전에 사용되고 있는데, 석탄연료를 대체할 수 있을 뿐 아니라 쓰레기 처리에도 유망한 기술이라 하겠다. CFB 반응기 기술은 국제적으로 확인되어 세계각국에서 에너지관련의 각종 공정에 응용되고 있는 기술이지만, 국내에는 관련 연구인력 및 설계기술이 아직도 매우 부족하다. 특히 자체설계 및 제작을 위한 실증연구가 필요하며 이를 통하여 관련 인력도 양성되어 국내 중공업에 인력문제가 해결될 것으로 기대한다.