

CFB 보일러에서 바이오매스와 슬러지 폐기물의 혼소기술

송병호

군산대학교 재료화학공학부 교수

1. 기술개요

○ 기술의 정의

바이오매스, 하수슬러지, 쓰레기 등에서 에너지를 얻기위해 연료형태에 대한 유연성이 매우 좋은 순환유동층을 이용하여 바이오매스 및 하수슬러지를 연료로 하는 보일러 시스템을 개발한다. 여기에는 슬러지의 원활한 공급 시스템이 우선적으로 개발되어야하고 석탄과 다른 연료사용으로 인한 파이롯 프렌트의 적절한 수정이 필요하며 그에 적합한 배기가스 오염물 처리 공정이 새로이 부가 개발된다.

○ 기술의 특징

쓰레기 매립처리에 대한 규제가 강화됨에 따라 인해 가연성 쓰레기는 계속 증가되고 있으며, 쓰레기의 형태도 역시 점점 더 다양하게 변하고 있다. 예를 들어 하수슬러지는 중금속 등의 물질이 포함되어 있어 더 이상 비료 등의 재활용이 불가능하다. 따라서 연료에 대한 유연성이 대부분의 쓰레기 소각 공정에 있어 가장 중요한 요건 중에 하나로 대두되고 있다. CFB 가 갖는 연료의 유연성을 Fig. 1에 조업창의 형태로 나타냈다. 연료내의 수분함량(5 - 60%)과 연료의 발열량(6 - 27 MJ/kg)을 축으로 잡아 하나의 보일러에서 처리가능한 구간을 가장 큰 창으로 나타냈다. 내부의 작은 창이 도시쓰레기의 조업가능범위를 나타낸다. 따라서 발열량이 낮은 연료는 오른쪽아래로 창이 이동할 것이며, 반대로 발열량이 높으면 그 반대편으로 이동할 것이다. 이와 같이 CFB가 수용가능한 연료의 범위는 매우 다양하다는 것을 알 수 있다.

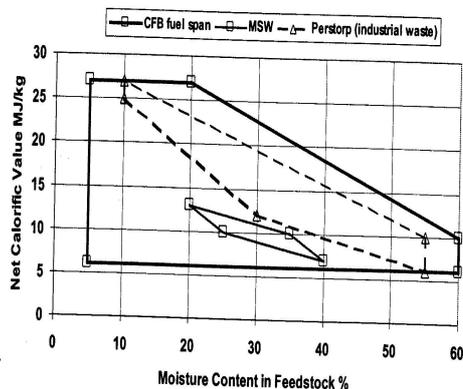


Figure 1. CFB fuel flexibility. The largest window shows the acceptable fuel design range. In this are the composition of a high NCV fuel, industrial waste (dotted line) and a typical MSW fuel (solid line).

CFB 연소기술은 오염물 배출특성이 매우 좋다. 이 주된 이유는 공기와 연료간의 강한 혼합과 함께 비교적 낮고 균일한 연소온도 때문이다. 배출 회분 중의 전형적인 미연탄소분은 바닥재가 0.1 %, 비산재가 0.5% 로 알려지고 있다. 이와 같은 훌륭한 연소상황으로 인해 회분 중에 dioxin 농도가 매우 낮아 보통 비산재에서 0.5 ng/g I-TEQ 이하로 알려지고 있다.

쓰레기연료를 다루기 위해서는 보일러 설계와 외부의 기기들에서 많은 고려가 필요하다. 순수한 바이오매스를 연료로 할 때와는 크게 다른 점은 :

- 연료의 공급이 보일러내에서 집중되지 않는다. 골고루 보일러내에 뿌려져야 할 것이다.
- 회분입자들이 좀 클것이고 회분함량도 많을 것이므로 유동화를 원활하게 유지하기 위해서는 총물질의 배출이 매우 원활하게 이루어져야 한다. 빠져나온 총물질은 회분 및 큰 입자들을 제거하고 다시 층으로 주입되어야 한다.

보일러 설계에도 여러 가지 차이가 있을 것이다. 예를 들면,

- 로 하부에는 특별히 제작된 방향성 있는 노즐이 부착되어서 회분의 이송이 원활하게 이루어져야 한다.
- 로의 높이 역시 체류시간에 관련된 규정에 따라 조정되어야 할 것이다. 아주 큰 CFB에서는 보일러의 높이가 사이클론에 의해 결정된다.
- 보일러는 보조버너가 있어서 온도가 850°C 아래로 떨어질 경우 자동으로 작동되어야 한다.
- 사이클론을 지난후에는 배기가스가 빈공간으로 되어있는 radiation cooling pass를 통과하면서 온도를 낮춘 후 촘촘하게 배열되어있는 열전달 관들을 지나게 한다. 이는 침적이나 부식을 최소화시켜준다. 이러한 이유로 배기가스의 유속이 낮아져야하고 배기가스와 스팀의 온도차이가 적어야한다. 따라서 superheater 및 evaporator surface가 커져야 할 것이다.

자꾸 새로이 제한되는 오염물의 규제에 호응하기 위해서는 유동층 연소로의 설계 추세는 보다 크고 보다 효율이 높은 열병합발전프렌트를 향하고 있다. 하수슬러지 역시 약간의 에너지를 함유하고 있으므로 이를 처리함과 동시에 에너지를 회수한다. 슬러지는 수분을 제거하면 pellet 형태의 고체 연료로 만들 수도 있겠으나, 이 경우 공정이 복잡해져 경제적으로 불리하므로 하수슬러지를 보일러에 직접 주입하는 단일 공정이 유리하다. 이를 위해서는 주입 연료 형태에 대해 유연성이 매우 좋은 순환유동층 반응기 형태를 적용한다. 한편 바이오매스의 경우에는 그 형상이 일정하지 않으므로 chip 혹은 pellet 제조 산업의 발달이 함께 필요하다. 슬러지의 연소특성에 대한 kinetics 연구는 기본적으로 필요하며 연소과정에서 발생하는 대기오염물질의 생성경로 및 생성 특성을 상세하게 파악해야만 한다. 이를 위해서는 반드시 CFB boiler pilot plant에서의 실험을 통한 개발 연구가 필요하다.

○ 타산업과의 연계 및 타산업에 미치는 영향

생활쓰레기, 하수슬러지, 폐타이어, 플라스틱, 고무 등은 잠정적인 에너지를 갖고 있으나, 아직까지도 재활용율은 매우 낮은 형편이다. 최근 정부에서는 2011년까지 소각처리율을 현재의 11.7 %에서 30 %로 증대시킬 예정으로 있는데 이처럼 대량의 쓰레기 소각에는 보조 연료로 석탄보다는 biomass 혹은 폐기물 그 자체의 열량을 최대한 사용하는 것이 경제적이

다. Biofuel은 나무, 펄프 및 제지산업 그리고 농업관련 산업의 폐기물에서부터 빠르게 성장하는 곡물에 이르기까지 매우 다양한 에너지자원이라 하겠다. 최근 들어 발전소나 utility 공장에서는 이 연료들을 석탄과 함께 처리함으로써 연료비도 절감하고 greenhouse 오염가스 배출을 줄이고자 하는데 관심이 더욱 높아지고 있다. 아직까지 우리나라에서는 바이오매스의 사용이 원활하지 못하지만 가까운 장래에 유럽이나 일본처럼 바이오매스의 사용이 필요할 것으로 예측된다.

2. 선진외국의 해당분야 산업동향 및 전망

○ 시대별 기술동향

우선 바이오매스의 소각기술은 특히 유럽에서 많은 개발이 이루어졌다. 유럽에서는 바이오매스나 폐기물의 처리가 당장의 선결과제이기 때문에 대부분 파이롯 플랜트나 상업용 규모의 실험을 병행하면서 공정의 연구개발이 진행되어 왔다. 특히 스웨덴과 핀란드는 유럽에서도 바이오매스 즉 산림자원이 가장 풍부한 관계로 바이오매스 혹은 폐기물의 대량 처리 공정에 세계적으로 큰 진전을 보이고 있다. 수도인 스톡홀름을 비롯하여 전국적으로 상당수의 유동층 열병합발전소를 건설 운영하고 있어서 유동층보일러 관련 연구에 세계적으로 최 선단에 서있다. 스웨덴에서는 1990년대 들어와서 wood pellets의 생산, 수송, 연소에 관한 기술이 급격히 발달되었다. 25개 공장에서 연간 250,000 톤을 생산하여 유럽에서 가장 많이

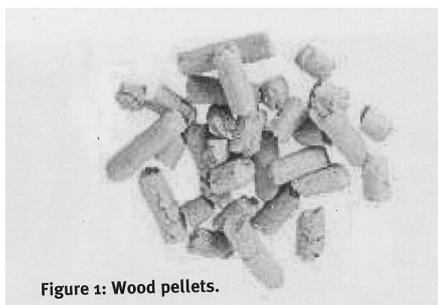


Figure 1: Wood pellets.

생산하고 있다. 역시 그에 따른 버너 연소기술이나 효율적인 수송체계 등이 함께 개발되어 효과적인 사용을 복돋아주고 있다. 이제는 몇 가지 큰 규모의 소비처 (즉, 지역난방이나 CHP plant)가 석탄대신 이러한 정련된 바이오매스 연료를 사용하여 열과 전기를 생산하고 있다. 또한 가정이나 빌딩 등의 적은 규모의 시장도 발달되었다. 물론 최근에는 대규모 플랜트에서도 정련되지 않

은 바이오매스, 즉 산림폐자원이거나 폐목재를 그대로 사용하는 추세이다. 적은 규모의 시스템에서도 많은 장점이 있어서 시장의 발달이 예기되고 있는데, 현재 25,000 개의 장치에서 150,000 ton/year를 사용하고 있다. 전열기 대신 난방용으로 사용하면 약 70%의 전기를 절약할 수 있다. 다음의 표에서 보듯이 이론적으로 작은 규모의 house에 난방설비로서의 시장잠재력은 현재 2백만개로 추산되며 에너지요구량으로는 50 TWh로 예측되고 있다.

Table 2: Theoretical market potential for wood pellet heating installations in small houses

Heating in small houses	Wood log	Oil	Electricity radiators	Electricity boiler	District heating	Natural gas	Total
No. of installations	400,000	562,000	514,000	241,000	144,000	20,000	1,881,000
TWh	12	14	14	7	3.6	0.6	51.2

○ 기술개발 추진실적 및 성과 (투자규모 포함)

Energy R&D in Sweden
(Million SEK)

	1997	1998	1999
TOTAL CONSERVATION	144	124	187
TOTAL FOSSIL FUELS	1	0	0
TOTAL NUCLEAR FISSION/FUSION	46	46	45
TOTAL POWER & STORAGE TECH.	87	62	130
TOTAL RENEWABLE ENERGY	69	113	111
Solar	14	22	20
Wind	12	32	26
Ocean	0	0	0
Biomass	42	57	61
Geothermal	0	0	0
Hydro	0	2	4
TOTAL OTHER TECH./RESEARCH	119	95	117
Energy Systems Analysis	12	2	7
Fundamental research	25	34	41
Other (general combustion/conversion techn. for solid fuels such as biomass etc)	82	59	70
TOTAL ENERGY RD&D	467	440	590

일단 스웨덴 정부에서는 위의 표와 같이 바이오매스를 포함한 재생에너지에 큰 투자를 하고 있다.

스웨덴 보일러 제작회사인 Kvaerner pulping은 소형의 가정용 보일러부터 시작하여 대형의 보일러까지 여러 형태의 보일러를 제작하고 있다. 펄프제지 공정에서 부산물로 발생하는 black liquor를 연료로 사용하는 recovery boiler 역시 주요한 생산품이다. 스웨덴에서는 오래전 부터 보일러를 많이 사용해왔으며 구형의 보일러들은 주로 연료형태에 따라 유연성이 좋은 유동층보일러로 교환되고 있다. 이 회사에서는 그야말로 다양한 연료(industrial wastes, MSW, RDF, sludge)를 처리하는 각종 보일러를 (15 - 600 MW) 제작하고 있는데, 약 1970년부터 유동층보일러를 제작하기 시작하였으며 지금까지 약 200 여개의 대형 보일러

러를 제작하였다. 아시아 쪽으로는 일본 Takuma 회사에 쓰레기처리 유동층보일러의 라이선스를 주고 있으며, 이를 통해 태국이나 대만에 진출하였다. 이들의 기술개발에 대한 예를 들어보면, 합판을 처리하는 보일러의 경우에는 합판을 부착할 때 들어가는 접착제 성분이 타면서 보일러의 부식을 야기할 수 있으므로 이를 해결하기 위해서 특별한 모래를 충물질로 사용하도록 개발하기도 하였다. 또한 쓰레기를 연소시키기 위하여 유체역학적인 시뮬레이션(CFD technique)를 사용하여 dead zone을 없애고 원활한 flow를 유지하도록 특별한 구조를 갖는 ACZ bubbling fluidized bed가 고안되기도 하였다.

Kvaerner pulping은 슬러지를 처리하는 유동층보일러를 1974년 처음으로 제작 설치하였다. 2002년 세워진 Norrkoping plant는 RDF 와 하수슬러지를 연료로 하는 스웨덴 최초의 프렌트로 알려질 것인데 근래에 Vastervik의 10 MW BFB와 Chalmers university의 12 MW CFB boiler에서 예비테스트가 수행되었다. Chalmers에서 석탄 혹은 바이오매스에다 슬러지를 섞어 넣는 혼소 테스트가 수행되었다.

스웨덴 Chalmers University of Technology에는 1990년에 12 MW CFB 보일러가 설치되었다(Fig.3). 이 보일러는 대학내 에너지의 주공급원으로서 전에는 석탄을 사용했지만, 최근 들어 정부에서 석탄에 세금을 많이 부과하는 바람에 현재는 주로 biomass (wood pellet, wood chip, demolition wood etc.)를 연료로 사용하고 있으며, 때때로 하수 슬러지를 혼합연소하는 연구가 수년전부터 진행되고 있다. 장기적인 실험측정이 필요한 열전달 표면의 erosion 문제라든지, 충물질이나 연료물질의 fragmentation, attrition 등의 측정이 어려운 부분에 대해 상용크기의 보일러에서 충분한 실험이 이루어질 수 있다. 12 MW CFB boiler에서는 3 년전부터 EC project로서 현재 하수슬러지와 wood pellet의 혼합연소에 대한 연구가 진행 중에 있다. 하수 슬러지에는 금속성분 등의 유해물이 제법 존재하기 때문에 이에 대한 정확한 추적이 필요하며, 공정으로부터 배출되는 배출흐름내 유해성분의 정확한 분석이 요구된다. 따라서 Chalmers에서는 배출가스로부터 H₂O, CO₂, SO₂, NO₂, CO, NO, HCl, HF, NH₃, N₂O 를 모두 한번에 online 분석할 수 있는 FT-IR gas analyzer를 최근 구입하였다. 한편 알칼리성분, 염소, 황 성분들은 열전달 튜브에 침적할 수 있다. 바이오매스에는 알칼리 및 염소 성분이 소량 존재하여 tube deposit 문제가 있으므로 이에 대한 연구도 필요하다. 배가스 중의 HCl 제거를 위하여 새로이 dry scrubbing system을 도입하였다. 즉, Ca(OH)₂ 분말을 공기로 이송하여서 상부의 2차 싸이크론과 백필터 사이에 노즐을 통하여 dry injection시킨다. 한편 하수 슬러지에는 6% 정도의 질소가 포함되어서 연소로 내에서 NO_x의 생성에 대한 상세한 연구도 필요하다. 그동안의 연구를 통해서 NO_x 생성을 줄이기 위하여 첫 번째 싸이크론의 가스 출구부분에 별도로 버너를 부가한 바 있다. 수분 70% 이상짜리 슬러지를 직접 보일러에 공급하기 위해 일단 oil로 작동되는 고압펌프를 독일로부터 수입하였다. 1990년대에 독일에서는 슬러지를 처리하기 위하여 슬러지를 석탄과 혼합연소하는 보일러가 약 20기가 건설되었으며, 이를 통하여 슬러지 펌프가 개발되었는데 이를 'hydraulic piston pump' 라고 한다. 슬러지의 주입위치도 최적의 위치를 찾아내었으며 슬러지를 탱크로부터 호퍼로 원활하게 자동 주입하기 위해서 moving grate system이 탱크 하부에 설치되었다.



Fig. 3. The 12 MW CFB boiler fuelled by biomass and coal.

○ 산업성장을 및 이용보급실적

스웨덴은 CHP plant 에 있어서 상당한 기술을 보유하고 있다. 주요 연구분야로는 연소 및 가스화, 가스터빈 천연가스와 바이오연료의 새로운 열역학적인 공정기술, 바이오연료를 사용하는 보일러에 적용할 스팀터빈의 기술, 보다 효율이 높은 발전기술 및 지역난방 기술 등을 갖고 있다. 현재 45개의 마을이 CHP plant를 소유하고 있거나 건설 중에 있는데, 총 발전량은 약 2,300 MW; 이 중에서 약 500 MW가 바이오매스를 연료로 하고 있다. 산업계에서는 약 50개의 CHP plants가 총용량 850 MW로 운전되고 있으며, 이 중에서 475 MW가 바이오매스를 연료로 사용할 수 있다. 바이오연료로부터의 발전량을 적어도 750 GWh 증대시키기 위하여 약 SEK 4.5 억이 5년에 걸쳐 투자되고 있다. 세계에서 에너지 효율이 가장 높은 프렌트 중의 하나인 Dava CHP 프렌트는 20여년의 연구를 통하여 1998년 건설이 시작되어 2000년 9월에 운전이 개시되었다. 이 프렌트는 도시쓰레기와 산림폐기물(forestry residues)을 연료로 사용하여 65 MW의 에너지를 생산하는데 이 중 10 MW는 지역발전소 grid에 전기를 공급하고 있다. 혁신적인 기술을 복합적으로 적용하여서 프렌트 효율이 매우 높아 투입되는 연료내 에너지를 거의 모두 회수하고 있다. 이 프렌트에서는 최초로 배기가스 중의 열을 회수하기 위하여 압축기 히트펌프를 사용하는 등 여러가지 혁신적인 기술을 사용하고 있다. 역시 연소나 배기가스처리 부분에서도 새로운 시스템을 적용하여 오염물의 배출을 큰 폭으로 격감시켰다.

4. 해당분야 기술개발/보급 및 산업의 성장애로 부문

○ 기술개발부문

현재 기술적인 불확실성은 처리가능한 슬러지의 최대 수분함유량 및 가스화 효율에 미치는 영향, 그리고 폐기물중의 주요 불순물의 행적이다. 하수슬러지는 주된 불순물인 질소를 7 wt% 까지 함유하고 있으며, 수분이 많기 때문에 석탄을 보조연료로 사용할 필요가 있다. 탈색슬러지의 전형적인 조성에서 주된 문제는 탄소함량이 낮고 회분함량이 높다는 것이다. 따라서 각종 슬러지의 물리화학적 조성에 따른 가스화 성능의 평가가 요구된다.