

저공해 쓰레기 발전 시스템(하)

(Low Emission Waste Power Generation System)

이희명, 남상천, 노철균
(주)아이티엔텍

목 차

- 1. 머리말
- 2. Rankine Cycle에 의한 발전원리
 - 2-1. Rankine Cycle
 - 2-2. 재열·재생 Cycle
- 3. 수증기 발생 시스템(Steam Generating System)
 - 3-1. RDF 소각 Boiler
 - 3-2. Boiler Bank
 - 3-3. 과열기(Superheater)
 - 3-4. 절탄기(Economizer)
 - 3-5. 공기 예열기(Air Preheater)
- 4. 전력발생 시스템(Electrical Generation System)
 - 4-1. Steam Turbine.
 - 4-2. Condenser(복수기)
 - 4-3. 저압급수가열기(Low Pressure Feedwater Heater)
 - 4-4. 탈기기(Deaerator)
 - 4-5. 냉각수와 냉각탑(Cooling Tower)
- 5. 쓰레기 발전소
 - 5-1. RDF 소각 발전소
 - 5-2. Massburn-Waterwall 발전소
 - 5-3. 쓰레기 발전의 경제적 이점
- 6. 맺음말

4. 2. Condenser(복수기)와 급수 Pump(Condensate Pump)

복수기는 Steam Turbine으로부터 배출되는 증기를 응축(복수)시키는 장치이며 증기를 복수시키므로 압력을 대기압 이하로 내리고 Steam Turbine의 출력 및 효율을 증가시킨다. 또 복수를 Boiler에 되돌리므로서 양질의 급

수를 확보할 수 있다. 따라서 일반적으로 Turbine에서 배출되는 증기를 냉각하여 복수시키는 복수기(Condenser)와 복수기로부터 Feed water를 끌어내는 급수 Pump로 되어 있다. 그림 9에 복수기의 구조를 표시하였다.

복수기는 복수의 회수를 목적으로 하는 외에 Rankine

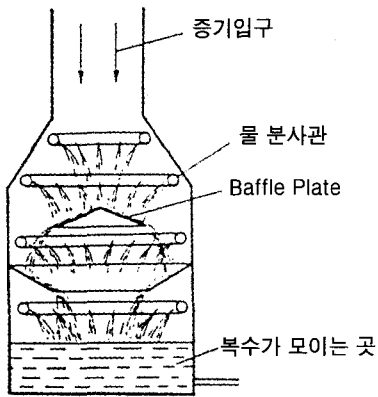


그림 9. Condenser (복수기)

Cycle의 열효율을 상승시키는 중요한 기기이다. 배기압력(배압)을 대기압 이하로 내리므로써 Turbine의 출력을 현저하게 증가시킬 수 있다. 그래서 대형 Steam Turbine에서는 복수기에 의해서 배기압력(배압)을 일반적으로 절대 압력 $0.03\sim 0.05\text{Kg/cm}^2$ 정도의 진공으로 유지하여 출력을 증가시키고 있다.

4. 3. 저압 급수 가열기(Low Pressure Feedwater Heater)

Turbine의 팽창과정에서 증기의 일부를 추출하여 재생 가열기에서 그 감열을 Boiler Feedwater에 회수시키면 Cycle 효율을 높일 수 있다.

이 Cycle을 채용하면 복수기의 냉각수에 버리게 되는 열의 일부를 유효하게 재생 이용하게 되어 Cycle 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 실체의 증기 Turbine에서 증기의 비체적이 현저하게 증가하는 저압부의 유량을 줄일 수 있기 때문에 이에 따르는 설비가 용의해지며 내부손실을 경감시킬 수 있다. 현재 대형 증기 Turbine에서는 널리 이 Cycle이 사용되고 있다. 그림 3에 저압 재생 Cycle이 표시되어 있다.

4. 4. 탈기기(Deaerator)

증기에 의하여 Feedwater를 급열하여 용해 Gas를 제거하는 장치이다. 가스의 용해량을 온도에 따라 변화하며 물의 Boiling Point에 도달하면 용해도가 Zero가 되는 원리를 응용한 것이다. 그림 10은 탈기기(Deaerator)의 원리를 표시한 것이며 이것은 Feedwater를 증기 등으로 약 90°C 정도로 가열하여 산소의 대부분을 기포상태에서 제거하게 된다.

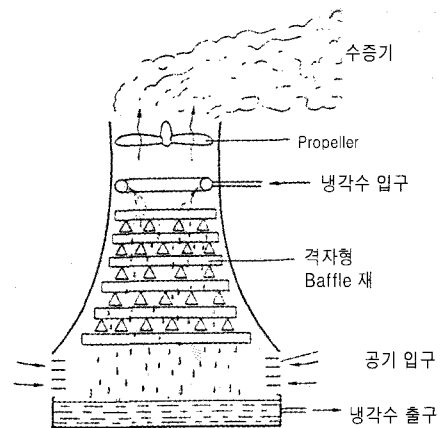


그림 10. Cooling Tower (냉각탑)

4. 5. 냉각수와 냉각탑(Cooling Tower)

보통은 냉각탑(Cooling Tower)에 냉각된 물을 복수기 냉각수로 사용하는 경우가 많다. 일반적으로 냉각탑은 큰 원통형의 증공탑(中空塔) 속에 많은 Baffle Plate를 두고 이 위에서부터 밑으로 온수를 적하(滴下)시키면, 이것이 밑으로 내려가는 동안에 밑으로부터 자연통풍으로 상승하는 공기와 접촉하여 직접적인 열 교환으로 물을 냉각하는 자연통풍 형식의 냉각탑과 그림 11과 같이 Propeller 송풍기로 강제적으로 냉각용 공기를 밑으로부터 흡입하는 강제통풍 형식이 있다.

냉각탑은 온도가 높은 대량의 공기를 발생시키므로 대용량일 때는 국지적인 기상에 영향을 주지 않도록 설치장소의 선정에도 유의해야 한다.

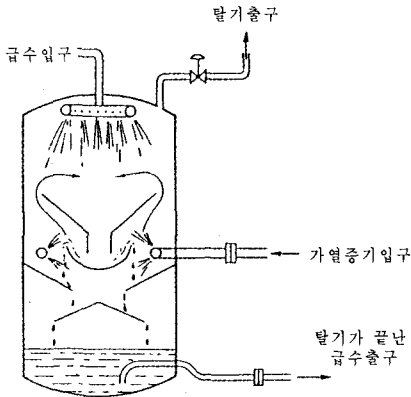


그림 11. 탈기(Deaerator)의 원리도

5. 쓰레기 발전소

5. 1. RDF 소각 발전소

그림 12에 RDF 발전소의 흐름도를 표시하였다. RDF를 Boiler의 측면 하부에 부착되어 있는 RDF 투입장치를 통해서 RDF를 압축공기로 살포하면 RDF는 건류되어서 연소하면서 이동 화격자상에 떨어지고 고정탄소는 화격자상에서 연소하여 재가 된다. 이때 연소는 공기가 부족한 상태에서 일어나기 때문에 오염물질의 발생이 대폭

감소된다.

환원 분위기에서 연소하면 어슬름, 미연소부, 흑염 또는 CO 등이 발생하는데 2차공기(Overfire Air)를 화염위에 주입하면 난류(Turbulence)가 생겨서 산소와 완전 혼합하여 완전 연소가 생긴다.

연소가스는 Boiler 상부에 있는 과열기(Superheater)에서 고온, 고압의 수증기가 발생해서 Steam Turbine을 구동하여 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환한다.

또한 Steam Turbine에서 일을 마친 수증기는 복수되어서 재생 가열기와 탈기기(Deaerator)를 통해서 Boiler에 다시 들어간다.

Boiler를 나온 연소가스는 Dry Scrubber에서 산성가스는 제거되고 분진과 중금속은 Baghouse에서 제거된다. NOx를 제거하는 SNCR와 다이옥신을 파괴한다는 SCR는 필요없다.

그림 13에 Boiler 내의 온도 분포를 표시하였다. 공기 예열기에서 250℃ 정도로 예열된 공기는 1차공기(Under grate Air)로 Boiler에 주입된다. 여기서 연소실 내에서 살포된 RDF를 연소시키고 발생한 어슬름, 미연소분 등은 2차공기와 완전히 혼합되어 완전연소를 하게 되고, 방열이 없으면 최종적으로는 약 2000℃의 이론 연소온도가 지 백열 연소한다.

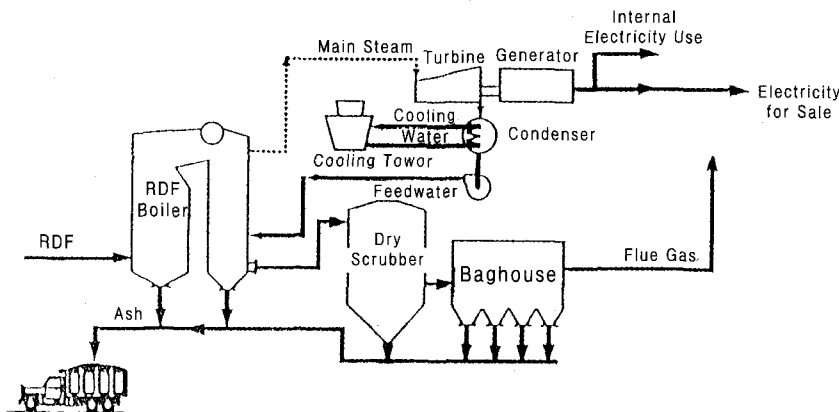


그림 12. RDF 발전소 시스템 (RDF Power Generation System)

그러나 실체는 열복사로 방열되기 때문에 연소실 내의 온도는 평균적으로 1400~1100℃에서 평행이 된다.

연소가스 출구온도는 약 1000~1300℃ 정도가 되는데 이 값은 기술적으로 매우 중요하며 발생하는 회분(Ash)의 용융온도가 낮거나 또는 금속에 의한 부식이 많으면 강하시켜야 한다. 과열기(Superheater), 재열기에 열을 전달한

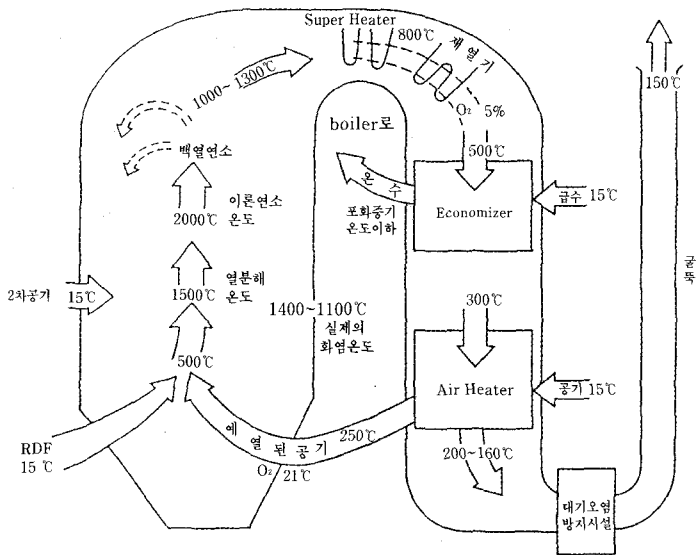


그림 13. Boiler 내의 온도분포

연소가스는 500℃ 정도의 온도가 되며 다시금 Economizer(절탄기), 공기 예열기 등의 열회수 장치를 통과한다. 여기서 물 및 공기와 열교환이 끝나면 200~160℃ 정도로 온도는 강하하며 대기오염 방지시설을 지난후 굴뚝에 의해서 대기중에 확산된다.

RDF 소각 발전소는 증기가 갖는 열 에너지의 이용면에서 볼 때 과열된 증기를 발전에만 사용하는 경우와 산업분야의 Process에 증기를 공급하는 경우로 대별할 수 있다. 그러나 쓰레기 발전의 경우는 발전에만 사용하는 것이 여러모로 편리하다. 표 1에 RDF 소각 발전소의 예를 표시하였다. 발전만을 목적으로 하므로 작동

표 1. RDF 소각 발전소의 예

Location	Description
1. maine Energy Recovery Co. Biddeford, Maine start up: 1986	Stokers: 2-spreader RotoGrate Grate Dimensions: 3391 mm × 6297mm (11'-1 1/2' × 20'-8") Refuse: RDF 13.2 tonnes/hour each4. (350 tons/day U.S. each) Refuse Heating Value: 3064 Kcal/Kg (5515 BTU/lb) Heat Release: 2072 Kj/sq meter/sec (657 KBTU/sq ft/hr) Gross Power Output: 20 MW Boilers: 2 Babcock & Wilcox Boiler Capacity: 45.4Kg/hr each (100000# stm/hr each) Steam Pressure 585KPa (665 PSIG) Steam Temp: 404℃ (760° F) Air Pollution Control: baghouse dry scrubber MCR: 48tph
2. North Country Regional Resource Recovery Facility West Palm Beach, Florida start up: 1988	Stokers: 2-spreader RotoGrate Grate Dimensions: 8877 mm × 6297mm (29'-1 1/2' × 20'-8") Refuse: RDF 37.8 tonnes/hour each (1000tons/day U.S. each) Refuse Heating Value: 3425 Kcal/Kg (6164 BTU/lb) Heat Release: 2195 Kj/sq meter/sec (696 KBTU/sq ft/hr) Gross Power Output: 61.4 MW Boilers: 2 Babcock & Wilcox Boiler Capacity: 128.028 Kg/hr each (282000# stm/hr each) Steam Pressure 5.171KPa (750 PSIG) Steam Temp: 398℃ (750° F) Air Pollution Control: elec. precip. dry scrubber MCR: 132tph

유체인 물과 그 증기에 의해서 구성되는 Cycle로서 재열·재생 Cycle을 사용하며 Turbine은 복수식 Turbine 이 된다.

재열, 재생 Cycle 단수를 증가시키면 Carnot Cycle에 가까워지는 경향이 있고 Turbine의 효율이 증가해서 출력도 커지고 내구성도 양호하게 된다.

5. 2. Massburn - Waterwall 발전소

Boiler의 수관이 연소실벽에 장치한 것으로서 대형 스토커 소각로에만 사용하고 있다. 그림 14에 Massburn - Waterwall 발전소를 표시하였다.

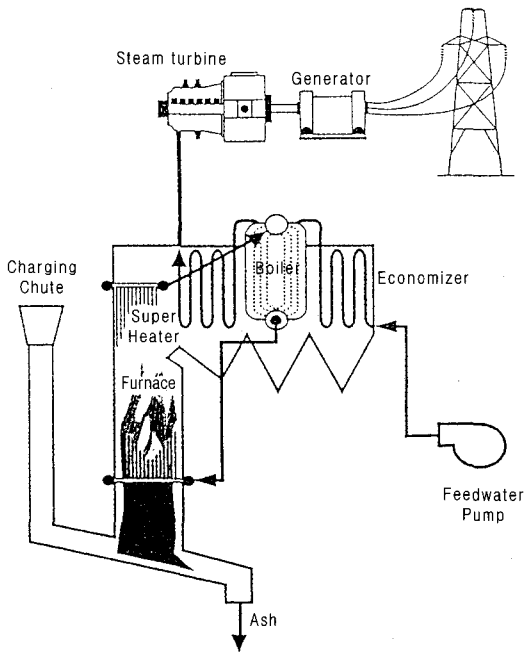


그림 14. Mass burn-Waterwall 발전소의 시스템

이 발전소의 특징은,

1) 대류형 Boiler : Boiler의 수관을 연소가스 흐름에 직각으로 장치되어 있어서 열의 대부분은 이 수관에서 포착되어서 포화 수증기를 발생한다.

- 2) Economizer(절탄기) : Boiler에서 나오는 가스에서 열을 얻어서 Feedwater를 가열하는 장치이다.
- 3) Superheater(과열기) : 보통 연소실 상부에 장치하여 Boiler에서 나오는 포화 수증기를 소정의 온도로 가열하는 장치이다.
- 4) 공기 예열기(Air Preheater) : Economizer 하부에 위치하고 있고 비교적 낮은 연소용 공기를 가열하는데 사용된다.

전술한 것 같이 Steam은 유익한 부산물이고 발전소 근처에 있는 산업단지나 주택에서 난방용으로 사용할 수 있다. 수증기 발생률을 아래 표에 기재하였다.

표 2. 수증기 발생률

MSW quality*	6500	6000	5000	4000	3000
Moisture, %	15	18	25	32	39
Noncombustible, %	14	16	20	24	28
Combustible, %	71	66	55	44	33
Steam generation.					
Ib/ton MSW	8600	7800	6400	4600	3000

*Heat value. Btu/lb as received.

그러나 수증기 사용자가 발전소 근처에 없으면 수증기 공급이 매우 불편하다. 그래서 전기를 공급하는 것이 더 편리하다. 그러나 Steam에서 전기로 변환할 때는 약간의 손실이 있다. 전력을 생산하는 데는 우선 수증기가 Turbine을 구동하고 Generator에서 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환할 때 약간의 손실이 생기는 결점이 있다. 대체적으로 Waterwall 방식의 총전기 생산량은 577 kwh/ton MSW이지만 중·소형 소각로에서는 350kwh/ton MSW로 감소한다.

5. 3. 쓰레기 발전의 경제적 이점

우리나라에서는 현재 가동중인 23기의 소각로에서 7,290tpd의 쓰레기를 처리하고 있고 현재 건설중인 7기의 소각로에서는 3,200tpd의 쓰레기를 처리하게 될 것이

다. 그러면 전체적으로는 10,490tpd의 쓰레기를 소각하게 된다. 만일 모든 것을 RDF Boiler로 전환한다고 가정하면 RDF Boiler의 발전량을 평균 33kw/ton이기 때문에 총발전량은,

$$10,490\text{ton/day} \times 33\text{kw/ton} = 346,170\text{kw/day}$$

이 된다. 연간 총발전량은,

$$346,170\text{kw/day} \times 365\text{day} = 126,352,050\text{MW/year}$$

이 된다.

우리나라 한 가정에서 사용하는 전력은 연간 2,400Kw이다. 그러므로

$$126,352,050\text{kw/year} \div 2,400\text{kw/year} = 52,647\text{가}$$

이고, 52,647 가정에서 사용할 수 있는 전력을 버려진 쓰레기에서 얻을 수 있다.

다음은 중유(重油)를 사용하는 경우를 생각해 보자. 중유한 Drum(Barrel)은,

$$3.0\text{kw/Gal} \times 55\text{Gal} = 165\text{kw/drum}$$

을 발생한다. 그러므로

$$346,170\text{kw/day} \div 165\text{kw/drum} = 2,098\text{drum/day}$$

매일 2,098 drum의 중유를 절약할 수 있으며 1년간에는,

$$2,098\text{drum} \times 365 = 765,770\text{drum}$$

을 절약할 수 있다.

금액으로는 1 Gallon의 중유값은 1,725원으로 치면

$$55 \times 765,770 \times 1,725 = \text{₩}72,652,428,750$$

으로 연간 726억원을 절약할 수 있다. 기름 한 방울 나오지 않는 우리나라에서 이렇게 많은 양의 에너지를 생각 없이 낭비하고 있는 것은 안타까운 일이다.

6. 맺음말

1. RDF 소각 Boiler System에서 Rankine Cycle에 따라서 발전이 되고 Super heating Technique을 사용하기 때문에 고온·고압의 수증기를 얻을 수 있어서 발전 효율이 매우 높다. 800kwh/ton을 능히 초과할 수 있다.
2. RDF은 환원 분위기에서 연소되기 때문에 NOx,

CO2, SOx, 다이옥신 및 퓨란과 같은 오염물질의 발생이 대폭 감소된다.

3. 스토키 방식 소각로에서도 수관을 연소실 벽에 장치하여 Boiler를 만들고 Superheating Technique를 사용하여 고온·고압 수증기를 얻어서 발전하고 있으나 발전 효율은 RDF 발전소보다는 떨어진다. 또한 환경오염물질이 다량 발생해서 SNCR와 SCR과 같은 고가의 장비가 필요하다.

4. 연료로서는 RDF, 석탄, 하수 슬러지 또는 Wood Chips 등을 사용하여 발전할 수 있다.

참고 문헌

1. 이희명, 남상천, 노철균, RDF 소각 Steam Boiler System, 첨단환경기술, 12월호, p.71, 2001.
2. 이희명, 남상천, 노철균, RDF 소각과 소각재 처리, 한국소각기술협의회 Workshop, 11월 16일, 2001.
3. 이희명, 남상천, 노철균, 스토키 소각로와 RDF 소각 Boiler System의 비교, 첨단환경기술, 1월호 2002.
4. 徐正閔, 熱氣動力工學, 淸文閣, 1980
5. Frank Kreith, Handbook of Solid Waste Management, McGraw-Hill, New York, 1994.
6. Tchobanulus, Theisen, Vigil, Integrated Solid Waste Management, McGraw-Hill, New York, 1993.
7. 鍵谷可, "ごみ固形燃料(RDF)の近未來を展望", 月刊廢棄物, 1月號, p.58, 2000.
8. H. Abbasi et al., Demonstration of Methane de-NOx Reburning for MSW Combustors, International Gas Research Conference, p.635, 1998.

