

저공해 쓰레기 발전 시스템(상)

(Low Emission Waste Power Generation System)

이희명, 남상천, 노철균
(주)아이티엔텍

목 차

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

1. 머리말

우리나라에서는 쓰레기 소각에서 발생하는 폐열을 이용하는 발전은 아직까지 미비한 상태이고 현재 전국에 약 12개의 쓰레기 소각장이 있고 그 중 발전을 수행하고 있는 소각장은 5개소 정도이며, 발전량은 11,550kw로서

발전한 전력은 시설 내 소비전력으로 주로 사용하고 한전에 매각하는 소각장은 아직까지 없는 상태이다.

한편으로 미국에서는 쓰레기 발전을 대대적으로 개발해서 에너지 회수를 하고 있어서 그 유의한 점을 증명하고 있다.

쓰레기 발전에는 두 방식을 사용하고 있으며 Waterwall

방식과 RDF 소각 Boiler 방식이 있다. Waterwall 방식은 스토카 소각로의 연소실벽에 수관(Water Tube)를 장착한 것이고 연소실 상부에 Superheater(과열기)를 부착하여 고온, 고압의 수증기를 얻고 있다. RDF 소각 Boiler 방식은 생활쓰레기(MSW)에서 RDF를 제작하여 화력발전소에서 사용하는 대형 Boiler 내에서 소각하는 방식이고 전국에 있는 142기의 스토카 소각로에서 86,000ton의 MSW를 소각하여 2,300 Megawatts를 발전하고 있고, 그 양은 17.3 million MWhr를 시장에 수출할 수 있는 양이다. 쓰레기 소각에서 얻은 전력이 얼마나 미국 경제에 영향을 주는지를 그림 1에서 볼 수 있다.

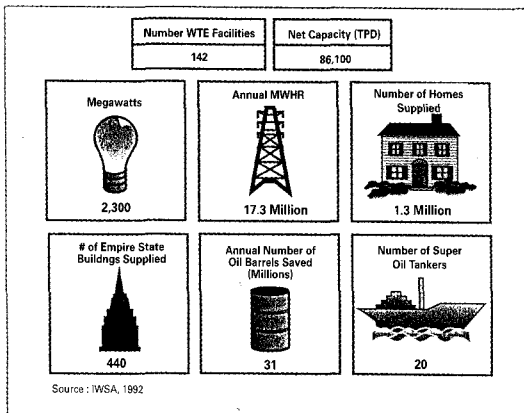


그림 1. WTE Power Supply and Energy Saving Potential

따라서 에너지가 대폭 부족한 우리나라에서 막대한 양의 각종 쓰레기가 배출되는데도 불구하고 전연 이용을 못하고 있는 실정이다. 다시 말하자면 우리는 이 귀중한 쓰레기 자원을 생각 없이 낭비만 하고 있는 것이다.

이 글에서는 아직 우리나라에는 잘 알려져 있지 않은 RDF를 이용하는 발전방식을 기술하고자 한다.

2. Rankine Cycle에 의한 발전 원리

2. 1. Rankine Cycle.

수증기를 작동유체로 사용하는 증기 발전소(Steam Power Plant)는 Boiler Plant와 Steam Turbine으로 되어 있다. Boiler Plant는 Boiler 및 그 부설설비 등으로 연료를 연소하여 수증기를 발생하기까지의 에너지 변환을 하고, Steam Turbine은 수증기에서 동력을 얻어서 발전하는 과정을 행하고 있다.

Rankine Cycle은 이상적인 Carnot Cycle에서 실현이 곤란한 습증기 상태에서 시작되는 단열압축 대신에 증기 Turbine에서의 배기를 전부 응축시켜서 포화수가 되게 한 후 급수 Pump로 단열압축하는 부분을 두며 또 불포화역(不飽和域) 및 과열역(過熱域)에서의 수열은 등온이 아니라 등압과정에서 하고, 또한 급수 Pump의 일은 이 Cycle의 일에서 빼게 되는데 이 Cycle이 실제의 Steam Power Plant의 비교 기준이 된다. 그림 2는 Rankine Cycle에서의 각 장치의 배치도와 T-S 곡선을 표시하였다.

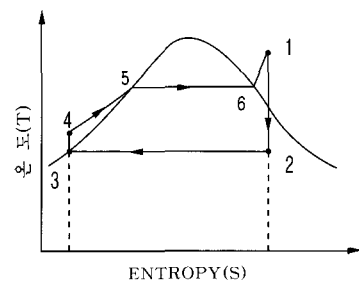
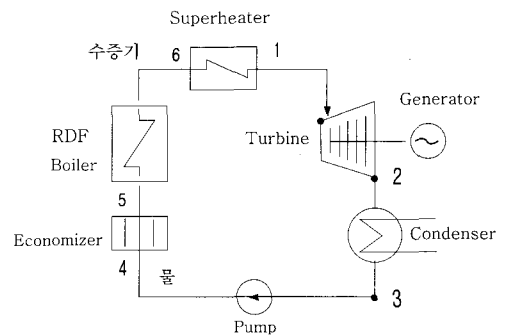


그림 2. Rankine Cycle에 의한 발전원리와 온도-Entropy 특성

2. 2. 재열 · 재생 Cycle.

증기 Turbine 내의 팽창 과정에서 증기를 Turbine 밖으로 뽑아내고 Boiler에서 다시 가열하여 거의 초기 온도 가까이까지 상승시키고 재차 증기 Turbine에 보내어 팽창을 계속시키는 Cycle을 재열 Cycle(Reheat Cycle)이라고 한다.

또한 재생 Cycle은 증기 Turbine 내의 팽창과정에서 증기의 일부를 빼내어 가열하여서 그 잠열(Latent heat)을 boiler 급수에 회수시키면 Cycle 효율을 높일 수 있다.

재열 및 재생 Cycle은 모두 이론 효율을 증가시킨다는 점에서는 그 목적이 동일하지만 그 근본 방침은 다르다. 즉 재열 Cycle에서는 Rankine Cycle의 고열원(高熱源)으로부터의 수열과정에서 생기는 불완전한 부분(非可逆過程)이 일부 보충되며 그 결과 배기의 습분도에 의한 증기 Turbine의 내부손실을 피할 수 있으며 열락차(熱落差)를 크게 만들게 된다.

재생 Cycle에서는 복수기(Condenser)에 방출하는 잠열을 감소시키므로써 효율을 증가시키게 된다.

따라서 이 두 특징을 동일 Cycle에 적용하여 Cycle 효율을 증가시킬 수 있다. 이 Cycle의 T-S 곡선은 그림 3과 같으며 재열단수와 재생단수가 증가할수록 Rankine Cycle의 불완전한 부분이 보완되므로 Carnot Cycle에 근접하는 경향이 있다.

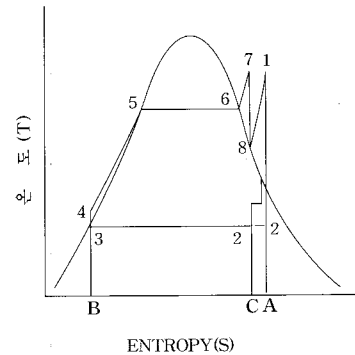
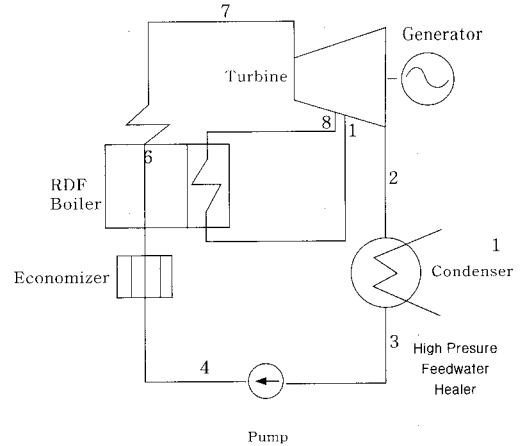


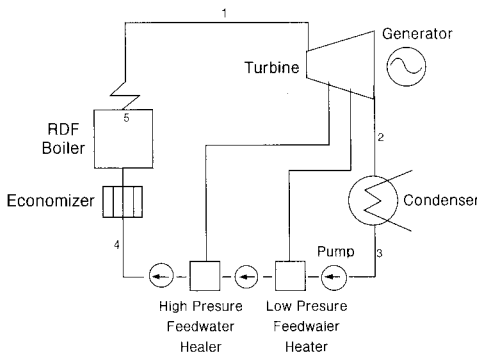
그림 3. 재열 · 재생 Cycle와 온도-Entropy 특성

3. 수증기 발생기구(Steam Generating System)

RDF 발전소의 수증기 발생기구(Steam Generating System)는 RDF 소각 Boiler(연료 연소와 수증기 발생이 동시에 생기), 과열기(Superheater), 절단기(Economizer) 등으로 되어 있고 그림 4에 RDF 소각 Boiler를 표시하였다.

3. 1. RDF 소각 Boiler(RDF Fired Steam Boiler)

RDF Boiler는 자연순환, 대용량 Steam Boiler이고 하



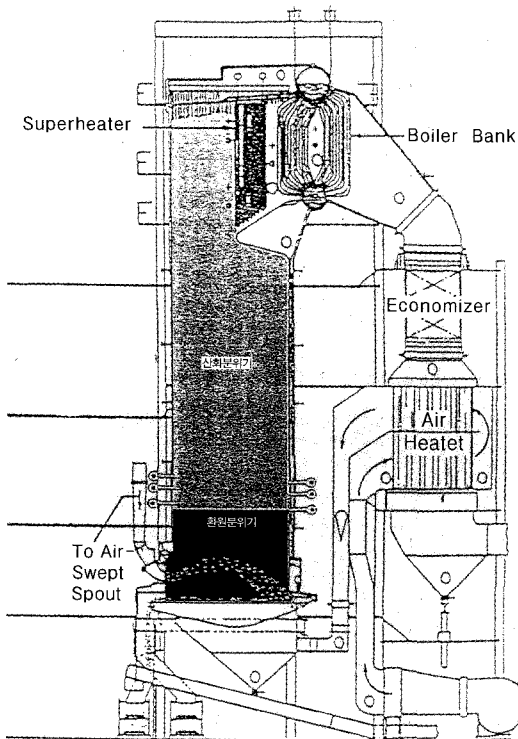


그림 4. RDF 소각 Boiler System

부에는 이동화격자(Traveling Grate)가 장치되어 있고 화격자 밑에서 1차 공기(Undergrate Air)가 들어오고 공기량은 과잉공기(Excess Air)가 들어오지 않도록 제어할 수 있다.

Boiler 하부 쪽에는 RDF 투입장치가 설치되어 있어서 압축공기로 RDF를 boiler 내부에 살포하면 RDF는 건류되면서 큰 입자는 멀리 떨어지고 작은 입자는 가까이 떨어지면서 공중에서 휘발분을 방출하면서 연소하고 남은 고정 탄소(Fixed Carbon)은 화격자상에서 연소하여 재가 된다. 이동 화격자를 투입구쪽으로 이동하는 방식을 취하면 화격자 끝에서 연료의 연소가 끝이 나도록 조절할 수 있다.

Boiler 하부는 환원 분위기가 조성되기 때문에 연료를 연소시킬 때 NOx, SOx, 다이옥신 및 퓨란과 같은 오염물

질은 대폭 감소되지만 대신에 그을음이나 흑연의 발생, 미연소분(Hydrocarbon)의 발생, CO의 발생 등이 생긴다. 그러면 엇갈리는 Nozzle을 설치하여 화염(火焰) 윗부분에 2차공기(Overfire Air)를 130% Excess Air로 주입하면 난류가 생겨서 그을음, 흑연, 미연소분, CO 등이 완전히 연소된다. 따라서 RDF 소각 Boiler에서는 오염물질이 최소한도로 발생한다.

환원 분위기(저산소 연소)는 저온 부식의 방지, 통풍 소요동력의 감소, 배출 Gas량 및 Boiler 효율의 개선 등에 유효하다. 그러나 연소 분위기의 영향을 적게 받는 Chlorine이나 Chloride의 부식을 방지하는 장치가 필요하다. Boiler 하부에 Inconel판을 장착하여 이것들을 방지하고 있다.

3. 2. Boiler Bank

자연 순환식 Boiler는 일반적으로 2개 이상의 Steam Drum을 갖추고 있으며 그 사이를 수관으로 연결하여 Boiler 본체를 구성하고 있다. Boiler 내에서 가열쪽의 수관내에 증기가 발생해서 증기와 포화수의 혼합물이 생기고 이 혼합물은 비중량이 감소하고 가열이 적고 증발을 일으키지 않는 관내의 물과 비교하면 비중차가 생겨서 가열쪽이 상승관(昇水管), 기타가 강수관(降水管)이 되어 자연순환이 일어난다.

3. 3. 과열기(Superheater)

과열기(Superheater)는 Boiler 본체에서 발생하는 포화증기를 가열하여 소정의 과열증기 온도까지 상승시키는 장치이며 T-S 곡선상에서 관여하는 부분을 표시하면 그림 2, 6-1과 같고 그림 5에 2단 평행식 과열기(Superheater)를 표시하였다.

발전의 효율을 증대시키기 위하여 고압, 고온 수증기를 요구하고 있기 때문에 Boiler 설계에 있어서 Superhea

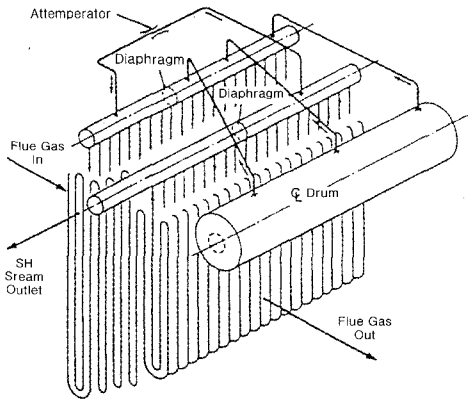


그림 5. Parallel Flow Superheater (2단 평행식 과열기)

ter는 가장 중요한 위치를 차지하고 있다. 또한 연소가스는 부식성이 강하기 때문에 부식문제도 심각한 문제로 대두되고 있다. 그래서 Superheater의 고온 전열면은 Incoloy를 사용하고 저온 전열면은 Carbon Steel을 사용하여 부식을 방지하고 있다. 또한 연소가스의 속도도 크게 문제가 되고 있어서 설계속도는 최고 9.1m/sec(30ft/sec)이지만 실체는 3~4.6m/sec(10~15ft/sec)을 쓰고 있고 Superheater 간격도 150mm(6in)을 쓰고 있다.

Superheater 출구에서의 증기조건은 온도는 800~850°F이고 증기압은 830~850psi이다. 그러나 각 회사에서는 Superheater의 수관에 부식과 침식이 생기지 않게 하면서 증기조건을 상승 시키려는 노력이 계속되고 있다. 목적은 발전소의 총효율을 증가시키면서 전력의 생산량을 증대하는데 있다.

3. 4. 절탄기(Economizer)

Boiler 출구쪽에 설치하는 Boiler Feedwater의 예열기이며 연소가스의 폐열을 이용하는 장치이다. T-S 곡선에서 이에 관여하는 부분을 표시하면 그림 2, 4-5와 같다.

Economizer는 일반적으로 수평, 연속 Tube Crossflow 설계이고 연소가스 최고속도 13.7m/sec(45ft/sec)에 대

해서 Economizer Side Spacing은 102mm(4in) 정도이면 충분하다. 그림 6에 Economizer의 구조를 표시하였다.

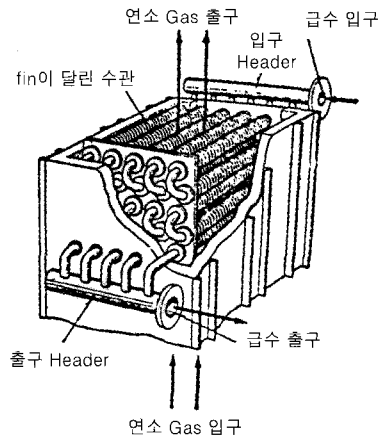


그림 6. Economizer의 구조

3. 5. 공기 예열기(Air Heater)

공기 예열기는 연소가스의 Boiler 출구쪽의 최종 위치에 설치하여 굴뚝으로 배출하기 전에 연소 gas로 연소용 공기를 예열하여 폐열을 회수하는 장치이며, 전술한 Economizer와 더불어 폐열회수에 의한 Boiler 효율의 향상에 유효하다. 화력차 연소의 경우는 연소용 공기로 화력차의 냉각을 하고 있으며 또 연소 온도의 상승에 의한 재(Ash)의 용융을 방지하기 위하여 보통 150℃ 정도 이하로 억제하도록 고려되고 있다. 그림 7에 공기 예열기의 구조를 표시하였다.

4. 전력 발생 시스템(Electrical Generation System)

Rankine Cycle의 마지막 부분은 Turbine-Generator이다. 이 장치는 증기의 열 에너지를 이용해서 Steam Turbine을 구동하여 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 장치이다. 그리고 사용한 수증기는 복수되어서

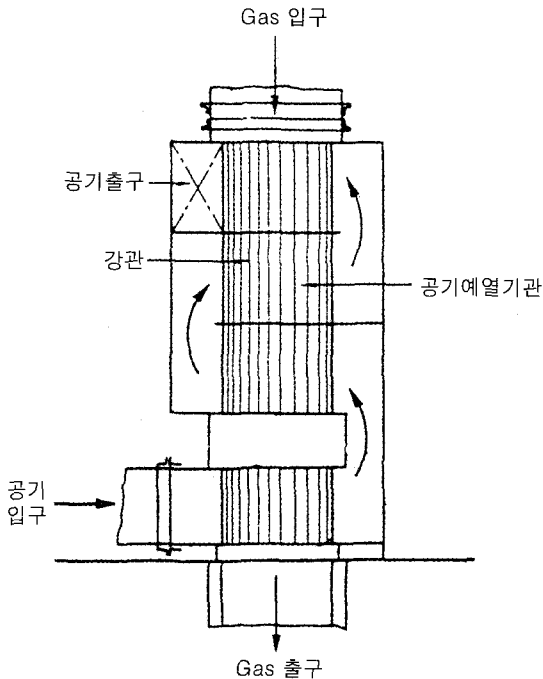


그림 7. 공기에열기 (Air Reheater)

Feedwater system을 통해서 Boiler로 다시 돌아간다. 그림 8에 전형적인 Energy Cycle을 표시하였다.

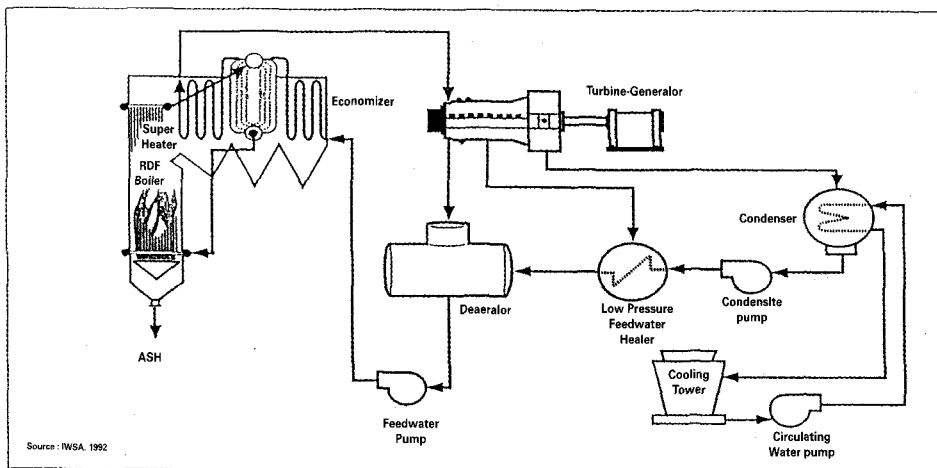


그림 8. Typical Energy Cycle

4. 1. Steam Turbine

증기 원동기(蒸氣原動機)는 Steam Engine과 Steam Turbine으로 나누어지며 Steam Engine은 증기 Turbine에 비해서 증량당 출력이 적고 열효율이 낮아서 주로 Steam Turbine을 사용한다. 증기 Cycle을 나타내는 T-S 곡선에서 증기 Turbine에 해당하는 부분을 나타내면 그림 2에서 1-2에 해당된다.

Steam Turbine의 Nozzle은 고정익(固定翼)이라고도 부르는데 증기를 팽창시켜서 운동 에너지로 전환하는 부분이고 이 증기 흐름에 의해서 익차(翼車)는 회전하며 동력이 발생하게 된다.

증기 Turbine 발전소의 총열효율(Overall Thermal Efficiency)은

$$\eta = \eta_B \cdot \eta_t \cdot \eta_R$$

로 표시된다. 여기서 η_B 는 Boiler 효율, η_R 는 이론 Rankine Cycle 열효율, η_t 는 Turbine 효율이다.

그런데 Boiler 효율 η_B 는 90% 전후가 되며, Turbine 효율 η_t 도 85% 전후가 되어서 거의 정수(Constant)로 취급할 수 있으므로 발전소 전체로서의 효율을 증가시키

기 위해서는 고온·고압의 증기를 사용하여 Cycle 효율 η_R 을 상승시키는 길 밖에는 없다. 따라서 증기를 Turbine의 중간에서 측기(抽氣)하여 Feedwater를 가열, 재생, 재열하는 것이 필수 조건이다.

다음호에 계속...