

# 스토카 소각로와 RDF 소각 Boiler System의 비교

이희명, 남상천, 노철균  
(주)아이티엠텍

## 목 차

- |                  |           |
|------------------|-----------|
| 1. 머리말           | 2. RDF 제작 |
| 3. RDF 소각 Boiler | 4. 방지시설   |
| 5. 쓰레기 발전        | 6. 특성 비교  |
| 7. 맺음말           |           |

### 1. 머리말

우리나라에서는 생활쓰레기(MSW)를 소각하는데 스토카 방식을 사용하고 있다. 원래 스토카 방식은 유럽에서 개발한 것이고 유럽의 쓰레기는 건조하고 분리수거가 잘 되어 있어서 소각하는 데는 별 문제가 없으나 우리나라 쓰레기에 적용했을 때는 습해서 연소가 잘 되지 않고 각종 오염물질이 배출되어서 사회적인 문제가 되고 있다.

미국에서는 이 스토카 방식(Mass-burn)에 대체하기 위해 RDF 소각로를 개발해서 사용하고 있다. RDF 소각로

는 정확한 의미의 소각로는 아니고 RDF를 연료로 사용하는 Steam Boiler이고 RDF 연료는 쓰레기(MSW)에서 비연성분(Non-Combustible)을 제거하고 유기성분만을 선출하여 절단(Shredding)과 선별(Screening)을 하여 연료로 제작한 것이다. 미국에서는 fluff RDF만을 주로 사용하고 일본에서는 Pellet형(d-RDF)을 사용하고 있으나 결과는 만족할 만한 것이 못된다.

현재 미국에는 약 20기의 RDF 소각 Boiler System이 있고 매일 약 30,580 ton의 쓰레기를 처리하고 있다(표 1). 미국에서는 이렇게 많은 RDF 소각 Boiler를 사용하고 있는데 한국에서는 아직도 스토카 방식에만 고집해서 스토카 방식에서 오는 여러 가지 피해에 골치를 앓고 있다.

그래서 이 글에서는 미국에서 많이 사용되는 RDF 소각 Boiler System과 한국에서 많이 사용되는 스토카 소각로를 비교해 보았다. 그 결과 미국에서 많이 사용되고 있는 RDF 소각 Boiler가 월등히 좋은 특성을 지니고 있다는 결론을 얻었다.

### 2. RDF 제작

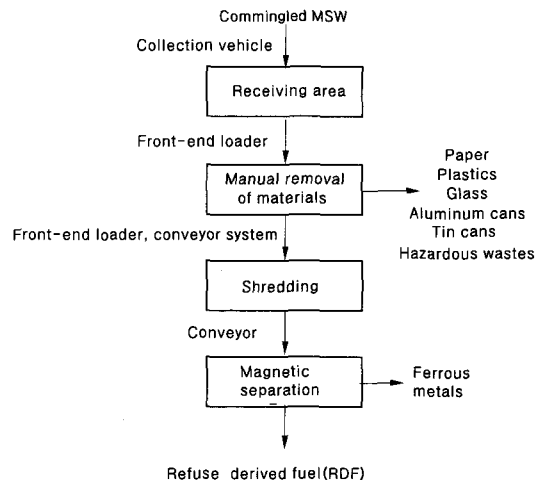
표1. RDF Refuse-To-Energy Facilities

Location	Plant Capacity(tpd)	Initial Operation	Status
Hamilton, Ontario	600	1972	Operating
Akron, Ohio	1,000	1979	Operating
Niagara Falls, N.Y.	2,000	1981	Operating
Albany, N.Y.	700	1981	Operating
Dade County, Fla.	3,000	1982	Operating
Columbus, Ohio	3,000	1983	Operating
Lawrence, Mass	900	1983	Operating
Biddeford, Maine	700	1986	Operating
Red Wing, Minn	940	1987	Operating
Mankato, Minn	940	1987	Operating
Portsmouth, Va.	2,000	1988	Operating
Hartford, Conn	2,000	1988	Operating
Wilmington, Del.	600	1988	Operating
Orrington, Maine	800	1988	Operating
Rochester, Mass.	1800	1988	Operating
Elk River, Minn	1,600	1988	Operating
Palm Beach, Fla	2,000	1989	Operating
Detroit, Mich.	4,000	1989	Operating
Honolulu, Hawaii	2,000	1989	Operating
<b>Total Capacity</b>	<b>30,580</b>		

RDF Boiler의 성공은 RDF를 얼마나 잘 제작하는가에 달려있다. 쓰레기를 우선 가연성(Combustible)과 비연성(Non-combustible)으로 분리하고 가연성 쓰레기는 선별(Screening)과 절단(Shredding)을 하여 RDF를 만들고 비연성 쓰레기에서는 재활용(Recycling) 할 수 있는 물질을 분류하고 마지막에 아무 쓸모가 없는 것은 매립(Landfilling)하여 처리한다. 이때 유해물질(Hazardous Wastes)도 별도로 분류하여 지정 매립지에 보낸다.

우리나라 쓰레기의 결점은 습(wet)하다는 것과 미국 쓰레기에 비해서 무기물(Ash Content)이 불과 12%밖에 되지 않는다는 점이다. 미국 쓰레기의 무기물은 30~35%이나 된다. 쓰레기가 습하면 선별기의 적은 구멍을 막아 버리기 때문에 선별하기가 불가능하다. 또한 무기물이 적으면 Air Classifier를 사용해서 선별할 필요성이

없어진다. 따라서 우리나라 쓰레기에는 절단만을 사용하는 것이 상책이다. 그림 1에 RDF의 생산 흐름도를 표시하였다.



[그림 1 RDF제작공정]

우선 수령(Received)한 쓰레기를 반자동식 수동선별대 (Semi-automatic Manual Sorting Station)에서 재활용할 수 있는 Plastic병 등을 분리하고 동시에 배터리 등 유해물질을 철저히 분리한다. 이것은 후에 대기를 오염시키는 유해가스의 발생을 미리 방지하는 가장 중요한 공정이다. 또한 소각재가 중금속이나 다이옥신으로 오염되는 것을 미리 방지하는 방법이기도 하다. 다음은 절단기 (Shredder)에서 쓰레기를 4"×4" (10.2cm×10.2cm)로 절단을 하고 자기선별기(Magnetic Separator)을 사용하여 철분의 85~90%를 제거한다. 이렇게 제작한 RDF는 fluff RDF라 하고 다음과 같은 특성을 지니고 있다.

Top Fuel Size : 4"×4"  
 Ash Content : 12%  
 Moisture : 25%  
 Heat Content : 6,000~6,300 Btu/lb

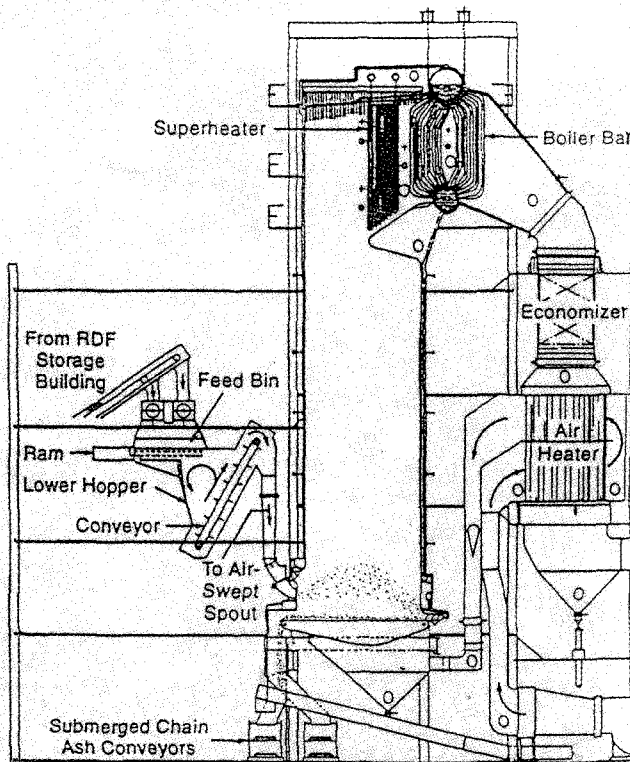
쓰레기에서 RDF를 제작했을 때 금속이나 무기물이 제거되어서 열량이 증가하는 것은 당연한 일이다. 제작한 fluff RDF를 저장장소에 적재하였다가 Conveyor로 Boiler의 Feeder에 주입된다.

### 3. RDF 소각 Steam Boiler

RDF Boiler는 대용량, 자연순환 수관(Water Tube) Boiler 이고 하부에 이동화격자 (Traveling Grate Stoker)가 장치되어 있고 하부쪽에는 RDF 투입장치 (Waste Feeder)가 있고 연료로서는 RDF, 석탄 또는 하수 슬러지를 사용할 수 있다. 그림 2에 RDF 소각 Steam Boiler 본체와 RDF 투입장치를 표시하였다.

RDF 투입장치는 RDF Boiler를 성공적으로 운영하는 데 가장 중요한 장치의 하나이다. 이것은 옛날의 증기기관차 (Steam Locomotive)에서 기관사가 삽으로 석탄을 일정한 양을 화상(火床)에 넓게 퍼지도록 살포하는 것과 같은 역할을 하는 것이다.

그림 2의 투입장치에 RDF가 Feed Bin을 통해서 Hopper에

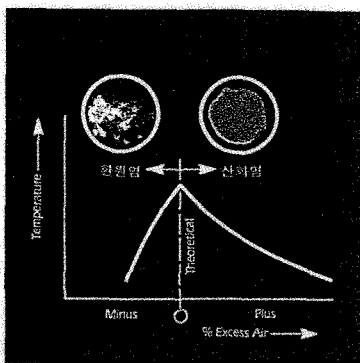


[그림 2 Steam Boiler 본체와 RDF 투입과정]

들어가서 Pan Conveyor로 Air Swept Spout로 이동하면 압축공기로 RDF를 Boiler 내부에 살포하게 된다. 살포된 연료의 큰 입자는 멀리 떨어지고 작은 입자는 가까이 떨어져서 화격자(Spreading Stoker)상에서 연소하게 된다.

공중에 살포된 연료는 건류 되어서 휘발성 유기성분이 떨어지면서 공기가 부족한 상태에서 연소하게 되어서 CO, H<sub>2</sub> 등의 연료가스를 발생해서 환원 분위기(Reducing Atmosphere)를 조성하게 된다.

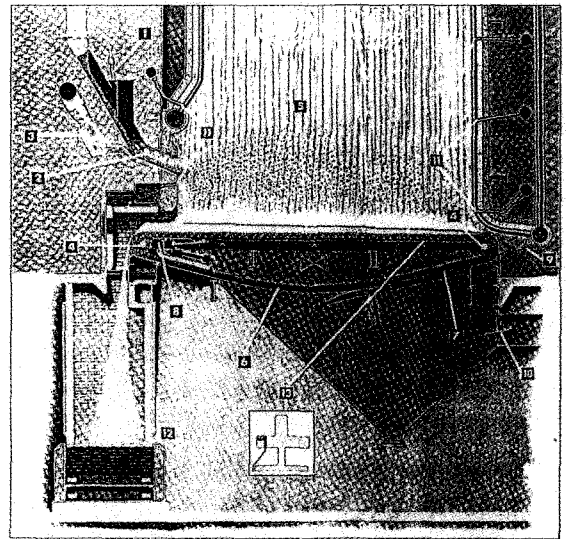
한편으로는 연소하고 남은 고정탄소(Fixed Carbon)는 화격자상에 떨어져서 밑에서 올라오는 과잉공기(Excess Air)에 의해서 연소되어서 CO<sub>2</sub>가스를 발생해서 산화분위기(Oxidizing Atmosphere)를 조성하게 된다. 따라서 Boiler내에서는 산화분위기와 환원분위기가 공존(共存)한다고 말할 수 있다. 그림 3에는 단열온도의 변화를 표시하고 환원염(炎)과 산화염(炎)을 같이 표시하였다.



[그림 3 단열온도의 변화와 공기공급량]

Boiler내에 환원염과 산화염이 같이 공존하고 있는 것이다. 그러나 이것을 좌우하는 것은 화격자 밑에서 들어오는 공기량(Undergrate Air)이 결정한다. 스토카 소각로에서는 Undergrate Air가 무제한으로 들어오기 때문에 산화 분위기가 우세하게 되어서 산화물을 오염물질로 생성하게 된다. NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 다이옥신 및 지구온난화가스

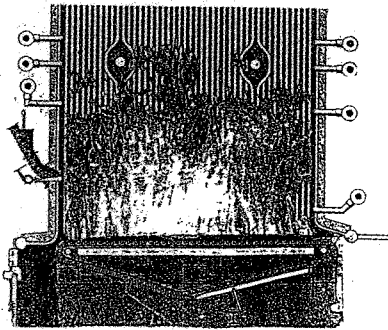
CO<sub>2</sub>가 다량 발생한다. 반면에 RDF Boiler에서는 그림 4에서 Boiler 하부에서 공기가 들어오는 것을 과잉공기(Excess Air)가 들어오지 않도록 제어할 수 있어서 Boiler내의 분위기는 환원 분위기가 우세하게 되어서 생성했던 산화물은 환원되어서 소멸하게 된다. 그래서 RDF Boiler에서는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, 다이옥신 등이 환원되어서 배출이 대폭 감소하게 된다. 이것은 스토카 소각로와는 매우 대조적인 현상이다.



[그림 4 이동화격자 (RotoGrate Stoker)]

- ① Balanced Damper Assembly
- ② Air Swept Spouts
- ③ Motorized Rotary Air Dampers
- ④ Front and Rear Grate Shafts
- ⑤ Grates
- ⑥ Gatenary
- ⑦ Rear Slides Rail
- ⑧ Automatic Under Grates Air Seal
- ⑨ Air Seals
- ⑩ Blast Gate
- ⑪ High Pressure Over Fine Air Jets
- ⑫ Ash Storage Hopper
- ⑬ Thermo Couple Assemblies

RDF Boiler는 수직으로 되어 있어서 가스의 흐름이 매우 빨라서 연료와 공기가 완전히 혼합이 되지 않는 경향이 있다. 그래서 완전 혼합(Turbulent Mixing)을 증가시키기 위하여 Boiler의 내벽에 구경이 큰 Nozzle을 서로 엇갈리게 설치하여 화염(Flame)의 윗부분에 2차 공기를 주입하면 난류(Turbulence)가 발생해서 완전 연소를 하게 된다. 그림 5에 난류가 발생하는 장면을 표시하였다.



(그림 5 2차 공기투입장치)

아직 미연소(未燃燒)한 연료는 윗부분으로 이동하고 2차 공기로 완전 혼합이 되어서 완전 연소하게 된다. 2차 공기로는 130% Excess Air가 주입된다. 윗부분에는 충분한 공간이 마련되어 있어서 충분한 잔류시간(Residence Time)을 주워서 완전 연소의 3T 조건을 만족시킬 수 있게 하였다.

이때 발생한 재는 화격자 전체 표면을 Cover하고 재의 두께가 203~254mm 되는 것이 중요하다. 이것은 용융한 금속입자가 화격자에 붙는 것을 방지하고 또한 마모를 감소시키는데 도움이 되기 때문이다.

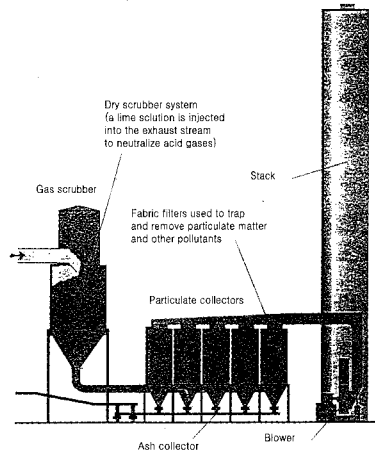
RDF Boiler의 이동 화격자 끝에서 바닥재가 떨어져 나오기 방지시설에서 비산재가 발생한다. 그러나 RDF 제작과정에서 유해물질과 중금속이 상당량 제거 되었고 또한 Boiler내의 환원 분위기에서 연소하기 때문에 발생하는 소각재의 오염도는 그리 심각하지 않다.

#### 4. 방지시설

스토카 방식과 RDF 방식의 커다란 차이점은 오염물질의 발생에 있다. 스토카 방식에서는 산화 분위기에서 연소하기 때문에 NOx, 다이옥신 등 각종 오염물질이 다량 발생하고 이것들은 제거하고 억제하는데 많은 고가의 장비가 필요하다. 그러나 RDF 방식에서는 정반대의 현상이 생긴다.

RDF 방식에서는 환원 분위기에서 연소하기 때문에 산화물 오염물질이 환원이 되어서 대폭 감소한다. 또한 지구 온난화 가스 CO<sub>2</sub>도 거의 발생하지 않는다. 그러나 연소 분위기에 영향을 받지 않은 염화물(Chlorides)이나 분진은 적절한 방법으로 제거하여야 한다. 따라서 RDF 방식은 방지시설이 비교적 간단하게 할 수 있다는 이점이 있다.

그림 6에서 Boiler에서 배출되는 Flue Gas는 Spray Dryer에서 산성가스(HCl, SO<sub>2</sub>)를 Ca(OH)<sub>2</sub>로 중화하여 제거할 수 있다. 또한 분진, 수은(Hg), 납(Pb) 등의 중금속은 Bag Filter에서 제거하는데 활성탄을 Bag 표면에 부착하여 수은(Hg), 납(Pb)과 같은 중금속을 흡착하여 제거할 수 있다.



(그림 6 방지시설)

어떤 이유에서든지 NOx 제거가 충분치 못할 경우에는 Methane de-Nox Reburning Process를 장착하면 NOx는 30~60% 감소하고 CO도 약 50% 감소한다. 또한 PCDD와 PCDF도 40~70% 감소한다.

NOx를 제거하는 SNCR와 다이옥신을 파괴한다는 SCR과 같은 고가의 장비는 필요없다. 그러나 스토카 소각로에서는 오염물질의 배출이 심해서 SNCR와 SCR을 모두 장착하고 있어서 스토카 소각로의 건설비는 증가한다.

### 5. 쓰레기 발전(RDF Power Generation)

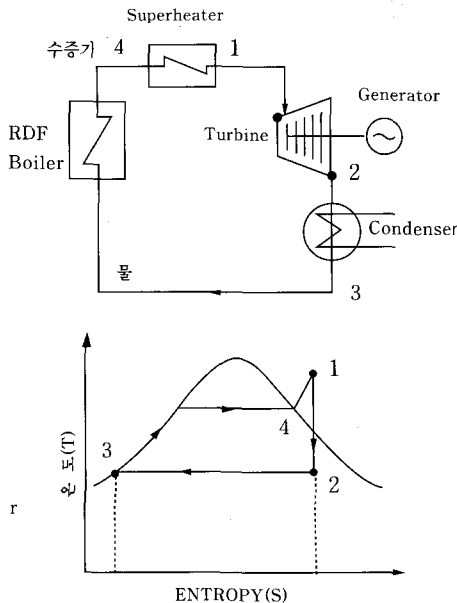
우리나라에서는 쓰레기 소각을 해서 발생하는 폐열을 이용하는 발전은 아직까지 미비한 상태이고 현재는 시설내 소비전력으로 주로 사용하고 있다. 한전에 매진하는 소각장은 아직까지 없는 상태이다. 따라서 앞으로는 RDF 소각에 의한 발전설비를 설치하는 소각장에 대한 검토가 적

극적으로 이루어져야 할 것이다.

쓰레기 발전 시스템은 일반적으로 그림 7과 같이 구성되고 Rankine Cycle을 따르고 있다.

RDF Boiler의 에너지 발생율은 RDF를 소각했을 때 발생하는 열량에 달려있고 소각하는 RDF의 수량에는 관계가 없다. Boiler내에서 연료를 소각하면 Boiler의 내벽은 수관(Water Wall)으로 둘러싸여 있고 물이 순환하면서 Boiler에서 폐열을 흡수하여 Steam Drum에서 수증기(Steam)로 증발하여 순환한다. 그리고 Superheater에서 더욱 가열되어서 Turbine으로 들어가서 일을 한다. 이때 수증기의 조건은 온도는 800~850°F이고 수증기 압력은 830~850 psig 범위이다. Turbine에서 일을 한 수증기는 복수(Condense) 되어서 Economizer에서 뜨거운 Flue Gas에서 열을 받아서 Feedwater를 가열해서 Steam 발생기구의 효율을 증가시킨다. 공정의 마지막 부분은 Turbine-Generator이고 열에너지를 기계적 에너지로 변동하여 전기 에너지로 발전한다.

미국의 소각로는 스토카 방식이건 RDF 방식이건 쓰레기 소각에서 얻은 폐열을 발전에 사용하고 있다. 그래서 스토카 방식과 RDF 방식을 다음 표에서 비교하였다.



[그림7 Rankine Cycle에 의한 발전원리와 온도-Entropy 특성]

미국의 쓰레기 발전량을 보면 모든 소각장에서 처리한 쓰레기량은 86,100 tpd였고 폐열을 이용한 발전량은 약 2,300 MW였고, 쓰레기 한 ton에서 발전하는 양은 641 kwh/ton이 된다.

RDF Boiler에서 발전하는 양은 768~816 kwh/ton이어서 미국 전체의 평균치 641 kwh/ton보다 더 많은 양을 발전하고 있다.

따라서 자원이 부족한 우리나라에서는 쓰레기를 귀중한 자원으로 생각해서 RDF Boiler를 건설하여 국민의 에너지 수요를 만족시킬 수 있다. 현재 가동중인 소각로에서 7,290 tpd의 쓰레기를 처리하고 있고 건설중인 소각로에서는 3,200 tpd의 쓰레기를 처리할 수 있을 것이다. 만일 모든 것을 RDF Boiler로 전환 한다고 가정하면 총발전

량은 346,170 Megawatts가 될 것이다. 우리는 이 귀중한 쓰레기를 너무도 생각없이 낭비하고 있는 것 같다.

**6. 스토카 방식과 RDF 방식의 비교**

표 2에서 California주에 있는 스토카 소각로와 Maine주에 있는 RDF Boiler를 비교하였다.

· 두 소각장의 용량은 비슷하지만 RDF의 성상이 균일하고 열량이 높아서 MSW보다는 연소효율이 높아서 증기 온도와 증기압이 낮아도 발전하는 양은 동일하다는 것은 RDF Boiler가 에너지면에서 효율이 좋다는 것을 의미한다.

· 스토카 소각로에는 거대하고 웅장한 연소실이 있으나 RDF Boiler에는 연소실은 없고 Boiler 자체내에서 RDF를 소각시키고 RDF의 50%는 공중에서 연소하고 나머지 50%는 화격자상에서 연소하기 때문에 Boiler 자체도 왜소하고 시설도 간단하게 된다.

· 스토카 소각로는 산화 분위기에서 연소하기 때문에 NOx가 발생하고 Exxon Thermal de-NOx System을 사용하고 있다. 산성가스과 분진은 Dry Scrubber와 Fabric Filter에서 제거된다. 이외에 다이옥신과 푸란도 발생하지만 제거된다. RDF Boiler는 환원 분위기에서 연소하기 때문에 NOx 등 오염물질의 발생이 적어서 방지시설을 장착할 필요가 없다. SNCR나 SCR와 같은

고가의 장비는 물론 필요없다.

· 건설비는 스토카 소각로보다는 RDF Boiler가 약 20% 저렴하지만 운영비는 RDF Boiler의 용량이 적을 때는 RDF 제작 비용 때문에 고가가 되지만 초대용량이 되면 오히려 RDF Boiler가 저렴하게 된다.

· 스토카 소각로에서는 자원 회수가 어렵지만 RDF Boiler는 자원 회수 뿐만

표2. 스토카방식과 RDF 방식의 비교

	스토카 방식(Mass-burn)	RDF 방식
용량(Capacity)	MSW : 800 tpd	MSW : 700 tpd RDF : 630 tpd
증기압과 온도 (Steam Pressure & Temperature)	865 lb/in <sup>2</sup> (psi) 830°F	665 psig 760°F
전기생산량 (Net Energy Outut)	20MW (Electical)	20MW (Electical)
화격자 (Grate)	Martin Inclined, Reverse Reciprocation Grate	Roto Grate Stoker (DSC)
보일러 (Boiler)	에너지 회수 Boiler	B & -W, RDF Boiler
연소실 (Combustion Chamber)	있음	없음
방치시설 (Air Pollution Control)	NOx-Exxon Thermal de-NOx Sysetm 산성가스-Dry Scrubbing 분진-Fabric Filter	NOx-필요없음 산성가스-Dry Scrubbing 분진-Fabric Filter
건설비 (Captial Cost)	\$84.8 million	\$68.6 million
운영비 (Operation & Maintenance)	\$23/ton MSW	\$630/ton MSW
Owner/Operator	Ogden Martin System, Inc Stanislaus County, California 1989 건설	Maine Energy Recovery Company, Biddeford, Maine 1987 건설

아니라 에너지 회수에도 큰 도움이 된다.

## 7. 맺음말

1. 쓰레기 소각에 있어서 RDF를 제작하여 Boiler에서 연소시키는 것이 가장 효과적이고 공해를 최소한도로 줄일 수 있고 자원 회수를 할 수 있다.
2. RDF Boiler System은 연소실이 없고 Boiler 자체도 적게 할 수 있고 공해가 적어서 방지시설이 간단해져서 건설비가 적게 든다. 또한 대용량에서는 운영비도 적어진다.
3. 스토카 소각로와 RDF 소각 Boiler System의 큰 차이는 연소 분위기에 있다. 스토카 소각로에서는 산화 분위기에서 쓰레기를 연소하기 때문에 각종 오염물질이 발생하고 RDF Boiler에서 본 환원 분위기에서 연소하기 때문에 각종 오염물질이 최소한도로 발생한다. 또한 발생하는 바닥재와 비산재도 오염이 적어서 유해물질로 취급할 필요는 없다.
4. RDF Boiler System에는 각종 연료를 사용할 수 있다. RDF 대신 석탄을 사용하면 저공해 석탄 화력발전소가 된다.

### 참고 문헌

1. 鍵谷可, "ごみ固形燃料(RDF)の 近未来を 展望", 月刊 廃棄物, 1月号, p.58, 2000.
2. 徐正閔민, 熱氣動力工學, 淸文閣, 1980
3. 이희명, 남상천, 노철균, 소각재 유리화 기술, 첨단환경 기술, 6월호, p.96. 2001.
4. 이희명, Arc Melter을 사용한 비산재 용융기술, 한국 소각기술협의회 Workshop, 6월 8일, p.93, 2001.
5. 이희명, 남상천, 노철균, RDF 소각과 소각재 처리, 한국소각기술협의회, Workshop, 11월 16일, 2001.
6. 이희명, 남상천, 노철균, RDF 소각 Steam Boiler System 첨단환경기술, 12월호(예정), 2001.
7. Detroit Stoker Co, Catalogs and Bulletins.
8. D.R. Bibbs & R.A. Kreidler, "What RDF Evolved Into", Waste Age, April, 1989, p.252.
9. Frank Kreith, Handbook of Solid Waste Management, McGraw-Hill, New York, 1994.
10. H. Abbasi et al., Demonstration of Methane de-NOx Reburning for MSW Combustors, International Gas Research Conference, p.635, 1998.
11. Neil H. Johnsen & David C. Reschly, "MSW and RDF: An Examination of The Combustion Process", Technical Paper, Detroit Stoker Company.
12. Tchobanulus, Theisen, Vigil, Integrated Solid Waste Management, McGraw-Hill, New York, 1993.



**UP GRADE 환경관리 '월간 환경관리인' 이 이끌어 갑니다**