

폐기물 고체연료(RDF)의 유동층 연소기술

김우현, 최연석, 길상인, 신병철*, 이조영*, 이제근**
 한국기계연구원 환경기계기술연구부, *삼성엔지니어링(주),
 **부경대학교 환경공학과

1. 서론

산업 및 경제발전으로 생활수준이 크게 향상되면서 폐기물의 발생량이 급격하게 증가되었다. 이러한 폐기물은 대부분 다른 에너지를 이용하여 처리되어 왔으나, 에너지 부족 문제와 함께 최종처분되는 매립지의 부족문제가 대두되면서 이를 동시에 해결한 방안을 모색하게 되었다. 이의 해결을 위해 도시쓰레기 등의 폐기물을 오히려 열원으로 이용하는 방법이 개발되었는데, 이것이 바로 도시폐기물 중 수분을 포함한 불연성분을 제거하고 가연성분을 가공하여 만든 쓰레기 재생연료 즉, RDF(refuse derived fuel)이다.

RDF 제조공정은 선별, 파쇄, 건조, 성형공정으로 이루어지는데, 제조회사마다 제조공정에 약간의 차이가 있으며 만들어지는 RDF의 성상에도 변동이 있다. 일반적으로 RDF는 상태에 따라 세종류로 나뉘는데, 비연소성 물질만을 제거하고 조각낸 상태의 쓰레기 재생연료(fluff RDF)와 그후에 감량시킨 상태의 쓰레기 재생연료(densified RDF; dRDF), mm크기의 작은 알맹이(pellet)로 연료화한 상태의 쓰레기 재생연료(powdered RDF; pRDF)가 있다.

선진외국에서는 RDF의 질을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, RDF의 성상 및 질에 따라 등급을 나누어 공급하고 있을 만큼 RDF에 관한 연구는 거의 완성단계에 이르러 있다. 그러나 국내의 쓰레기 성상은 국외의 것과는 크게 달라 국내 쓰레기성상을 고려하지 않은 무분별한 기술도입으로 RDF 플랜트 설치는 여러 차례 실패하였으며, 일부 연구진에 의해 RDF 제조에 관한 연구가 계속 진행되고 있긴 하나 실용화를 위해서는 보다 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

RDF를 이용한 연소기술은 선진외국의 경우 활발히 연구가 진행되어 현재는 RDF를 이용한 발전소 및 기타 연소시설이 실용화되어 있는 반면 국내의 경우 아직 RDF를 이용한 연소기술에 관한 연구는 거의 진행되지 않고 있다. RDF 연소시스템에는 spreader-stoker system, fluidized bed system, suspension firing system 등이 있으나, 휘발분이 많아 적절한 체류시간의 확보가 필요하고 도시쓰레기의 특성상 부식성 가스성분인 염소를 다량 함유하고 있는 RDF의 연소에는 유동층 연소로가 가장 적합한 것으로 여겨지고 있다.

유동층 연소로에 RDF를 적용할 경우 타소각로에 비해 얻어지는 장점은 다음과 같다. 첫째, 유동층 연소로에서는 유동화를 위한 충매질을 사용하지 않으므로 열 보유율이 뛰어나 RDF와 같은 저급연료에 다량 함유된 비연소성 물질 또는 수분 등의 급격한 함량변화에 덜 민감하다. 둘째, RDF에 다량 함유된 휘발분을 연소하는데 충분히 긴 체류시간을 확보할 수 있다. 셋째, 타 소각로에 비해 황산화물, 염화수소가스, 질소산화물 등 대기오염물질의 제어성능이 우수하다. 따라서 본 고에서는 RDF의 유동층 연소기술에 대하여 소개하고자 한다.

2. 국내 폐기물 현황

가. 폐기물의 발생 현황

우리나라의 폐기물 발생량은 table 2.1과 같이 총량기준으로 보면 점진적으로 증가 추세에 있으나 생활폐기물은 1990년대에 들어 감소 추세를 보이고 있으며, 사업장 폐기물은 높은 증가율을 보이고 있다. 생활쓰레기 발생량은 1995년 1인당 1.1kg/일에서 1999년에는 0.97kg/일로 감소하여 선진국 수준(독일 0.88kg/일, 영국 0.93kg/일)에 도달하였으며, 이것은 청정연료 사용 확대와 쓰레기 종량제 실시 등에 기인된 것으로 보이며, 성상별로는 플라스틱 등 포장폐기물과 종이류 등 가연성폐기물이 증가하고 연탄재 등 불연성폐기물은 감소되는 추세이다.

Table 2.1 폐기물 발생량 추이

(단위 : 톤/일)

년도	총 계	생활폐기물	(1인당 발생량)	사업장폐기물	건설폐기물
1995	143,597	47,774	(1.1 kg/일)	95,823	-
1996	175,334	49,925	(1.1 kg/일)	96,984	28,425
1997	189,200	47,895	(1.05 kg/일)	93,528	47,777
1998	184,989	44,583	(0.96 kg/일)	92,713	47,693
1999	211,728	45,614	(0.97 kg/일)	103,893	62,221

※ '95년도는 건설폐기물이 포함된 수치이며, 지정 폐기물은 제외함

연도별 생활폐기물 조성은 table 2.2와 같으며 생활폐기물 중 가연성쓰레기는 60% 정도 차지하고 있으나 그중에서 음식물류가 25%로서 매우 높은 비중을 차지하고 있다.

Table 2.2 연도별 생활폐기물 조성

(단위:톤/일)

년 도	합 계	가 연 성					불연성	재활용
		소 계	음식물 채소류	종이류	나무류	기 타		
1995	47,774	36,192	15,075	11,203	1,938	7,976	11,582	-
1996	49,925	30,306	14,532	6,380	1,857	7,537	7,456	12,163
1997	47,895	28,739	13,063	6,057	1,905	7,714	6,675	12,481
1998	44,583	26,435	11,798	5,620	1,848	7,169	5,332	12,816
1999	45,614	27,312	11,577	5,786	1,862	8,087	5,082	13,220

사업장 일반폐기물 조성을 살펴보면 table 2.3과 같으며 전체 발생량중 75%가 불연성이며, 가연성 중에서도 오폐수가 62%로서 높은 비중을 차지하고 있다

Table 2.3 연도별 사업장 일반폐기물 조성

(단위 : 톤/일)

구분	총 계	가 연 성							불연성
		소 계	종이류	나무류	고분자	동식물성 잔재류	오폐수	기 타	
1995	95,823	23,446	2,719	1,215	5,709	2,343	11,460	-	72,377
1996	96,984	26,607	1,787	1,343	5,051	1,517	16,813	96	70,377
1997	93,528	27,851	966	892	3,474	1,929	19,703	887	65,677
1998	92,713	27,497	922	671	3,137	1,806	20,400	561	65,216
1999	103,893	26,037	992	926	3,844	2,451	16,035	1,789	77,856

※ '95년도까지는 건설폐기물이 포함된 자료임

나. 폐기물 처리현황

1999년도 일반폐기물 처리 현황은 table 2.4와 같으며 재활용 66.0%, 소각 5.8%, 매립 25%, 기타 3%로서 대부분이 매립 또는 재활용되고 있다. 생활폐기물은 종량제 실시에 따른 분리수거 활성화 등으로 재활용율이 1999년에 38.1%('93년: 11.5%)로 점진적으로 증가 추세에 있으며 매립율은 1999년에 51.6%('93년: 86.2%)로서 높아 아직도 생활폐기물의 대부분을 매립에 의존하고 있으나, 매립장 건설적지의 감소 및 지역주민의 집단민원 등에 따라 추가적인 매립지 확보에 어려움이 상존하고 있다. 사업장 일반폐기물은 18.5%는 매립, 69.2%가 재활용되고 있으며 비교적 단일성상으로 배출되는 경우가 많아 재활용율이 높으나 상대적으로 불연성 폐기물이 많아 소각처리에는 한계가 있다.

Table 2.4 1999년도 일반폐기물 처리현황

구 분	계		생 활 폐기물		사업장 일반폐기물		건 설 폐기물	
	(톤/일)	(%)	(톤/일)	(%)	(톤/일)	(%)	(톤/일)	(%)
계	211,728	100	45,614	100	103,893	100	62,221	100
매 립	53,401	25.2	23,545	51.6	19,256	18.5	10,600	17.0
소 각	12,291	5.8	4,675	10.3	6,338	6.1	1,278	2.1
재활용	139,625	66.0	17,394	38.1	71,888	69.2	50,343	80.9
기타	6,411	3.0	-	-	6,411	6.2	-	-

가연성폐기물의 처리현황을 살펴보면 rable 2.5와 같으며 사업장폐기물과 건설 폐기물을 포함한 1999년도 일반 가연성폐기물 처리는 재활용 28.9%, 소각 20.8%, 매립 42.9%, 기타 7.4%로서 대부분이 매립 또는 재활용되고 있다.

Table 2.5 1999년도 일반 가연성폐기물 처리실태

구 분	계		생 활 폐기물		사업장 일반폐기물		건 설 폐기물	
	(톤/일)	(%)	(톤/일)	(%)	(톤/일)	(%)	(톤/일)	(%)
계	57,774	100	27,312	100	26,038	100	4,424	100
매 립	24,773	42.9	18,509	67.8	4,178	16.0	2,086	47.2
소 각	12,030	20.8	4,602	16.8	6,268	24.1	1,160	26.2
재활용	16,676	28.9	4,201	15.4	11,297	43.4	1,178	26.6
기타	4,295	7.4	-	-	4,295	16.5	-	-

다. 폐기물 발생 및 처리 전망

폐기물처리가 사회적인 문제로 대두됨에 따라 생산단계, 유통단계, 소비단계에서 폐기물발생을 최대한 억제하여야 하며 폐기물을 감량, 재이용, 재활용하여 최소화하도록 할 것으로 전망된다. 그리고 매립장건설 적지의 감소 및 지역주민의 집단민원 등에 따라 추가적인 매립지 확보 애로로 인하여 정부에서는 소각율을 2001년도 이후에 15% 이상으로 계속 높이도록 하고, 지자체에 시설비 지원하는 방안이 검토되고 있다. 참고로 관련 시행법규중 시행령 4조 별표 1항을 살펴보면 폐기물관리법 시행령에 따르며, 폐기물량을 최소화하도록 수분 함량, 크기 및 소각, 매립기준을 정하고 있으며, 특별시, 광역시 또는 시 지역에서 발생하는 음식물류폐기물은 2005년 1월 1일 이후에 직매립이 금지되고, 소각, 퇴비화, 사료화 또는 소멸화 처리후 발생하는 잔재물만 매립이 가능토록 하고, 유기성 오니(고형물 중 유기성물질의 함량이 40% 이상)는 2001년 1월 1일 이후 직매립이 금지되었으며 소각, 고형화처리 또는 생물화학적처리를 거쳐 퇴비사용, 수분함량을 줄여 관리형 매립지에 매립하도록 되어 있다.

3. RDF의 특성 및 제조기술

RDF 특성은 에너지 및 환경의 두가지 측면에서 살펴볼 수 있는데 에너지특성은 경제성과 관계가 있으며 대략 에너지자원 측면과 건설 및 유지관리비 측면으로 나눌 수 있고 환경특성으로는 폐기물처리 측면, 대기오염 측면, 기타잔류물 특성 측면으로 나눌 수 있다.

가. 에너지 측면에서의 RDF특성

RDF는 연소에 의한 열에너지를 회수함으로써 에너지자원으로서의 역할을 하게 되는데 이와 관련된 항목별 내용은 다음과 같다.

- RDF는 연소가 안정적이다. 제조공정에서 불연물이 미리 제거되고, 작게 파쇄된 다음에 혼합, 압축, 성형되므로 조성가연성분이 균일하고 함수율은 10% 이하가 되므로 생활폐기물RDF의 경우 발열량이 약 3,500~4,500 Kcal/Kg 정도의 연료가 된다. 발열량이 일정하므로 연소에 필요한 공기량이 일정하고 연료의 모양이 거의 일정하므로 열전도도 균일하다. 또한 RDF는 열회수를 목적으로 한 전용보일러를 이용하므로써 열회수 효율을 높일 수 있다.
- RDF는 열이용의 범위가 넓다. 즉, RDF의 운반, 보관이 용이하고 필요한 장소와 필요한 시기에 열이용이 가능하며 열이용의 형태에 적합한 전용 보일러를 선택함에 따라서 열이용 범위를 넓힐 수 있다. 또한 기존의 석탄보일러와 같은 고체연료보일러에서 이용이 가능하며 발전이용에서는 석탄 화력 발전소에서 석탄과 혼소가 가능하다. RDF의 사용사례는 다음과 같다.
 - 학교, 호텔, 병원, 사무실등의 냉난방 및 급탕
 - 화초, 야채, 과일등의 하우스난방
 - 청소업 및 식품업의 급탕
 - 제지공장, 시멘트제조업, 석회제조업, 제철소의 보조연료
 - RDF전용 발전 및 석탄혼소 발전 연료
- RDF발전시스템과 일반폐기물 소각발전시스템에서의 발전효율을 비교해서 조사한 연구에 의하면 동일 폐기물량으로 발전해서 송전 가능한 전기량이 RDF제조에 필요한 에너지와 RDF수송거리 40km까지 소요에너지를 고려해도 RDF발전의 경우가 소각발전에 비해 약 2.6배정도 효율이 높은 것으로 보고하고 있다.
- 중소 지방자치단체에 설치된 중소형소각로는 배출되는 폐기물의 발생량이 한정되어 있으므로 연속운전이 어렵고, 따라서 지속적이고 안정적인 에너지공급을 할 수 없으므로 실질적으로 폐열의 이용은 거의 불가능하다. 반면에 RDF는 아무리 소량의 폐기물이라도 고형연료화해서 필요시, 필요한 장소에서 연료자원으로 사용이 가능하다.

나. 환경적 측면에서의 RDF 특성

(1). 폐기물처리 측면

- RDF제조과정에서 다이옥신과 같은 유해가스나 소각재 등이 전혀 발생하지 않으므로 RDF시설의 건설에 있어서 주민의 동의를 구하기 쉽고, 아울러 폐기물recycle 시설로서 지역을 대표하는 시설이 되기 때문에 지역의 이미지향상에 도움이 된다.
- 소각처리 시설에 비교해서 건설비가 저렴하고 유지관리가 용이하다.

(2). 대기오염 측면

- RDF와 관련된 대기오염문제는 RDF 사용처의 연소로에서 배출되는 가스와 관계되는데 RDF는 중화제가 첨가되어 있으며 균질한 성상의 안정된 연료이므로 대기오염물질의 배출량은 일반 소각과 비교해서 크게 감소한다. 그러나 완벽한 대기오염방지를 위해서는 백필터와 소량의 석회분무처리가 필요한데 유지비의 부담은 경미하다.
- 발열량의 변동이 적으므로 완전연소(CO농도; 100ppm이하) 및 연소로내 온도의 관리가 용이하다.
- 염화수소 발생농도가 낮다. 염화비닐수지 등 유기염소재질의 대형 제품이 고형연료화의 인력선별 공정에서 대강 제거되고, 또한 소석회를 첨가시키므로 발생농도가 낮다.
- 다이옥신의 발생농도가 단순 소각의 1/100 이하로 매우 낮다.
- 연료중의 수분이 10%이하이므로 배연가스 중의 수분이 적어서 백연방지의 대책이 필요 없다.
- 일반적으로 중금속류의 염화물은 증기압이 높아서 휘발하기 쉽다. 고형연료화 공정에서 대형의 염화비닐류가 제거되고 소석회도 첨가되므로 중금속류의 염화물이 적게 생성되므로 비산이 적다.

(3). 기타 특성

- 연소재는 불연물이 미리 제거되므로 잔재량이 10%이하가 되며 또 비산재의 발생량도 고형화된 연료이기 때문에 적게 발생한다.
- 연소재 속에 중금속의 용출량이 적고 비산재에는 염소계 플라스틱 제거를 위한 소석회 등이 첨가되어 있으므로 휘산하기 쉬운 중금속염화물의 생성을 억제하는 것이 가능하다.
- 완전연소를 하기 때문에 소각재중의 미연분이 매우 적다.

다. RDF 제조 기술

함수율이 높은 도시폐기물을 고체연료화 하는 공정은 제작사에 따라 다소 차이는 있으나 양질의 RDF를 제조하기 위해서는 성형 이전의 선별공정에서 불연물을 제거하는 것이 중요하다. 특히, 수분이 40% 이상이 되는 국내 도시쓰레기의 경우에는 건조공정이 중요하다. 쓰레기의 수분 함량이 높은 경우 고

형화 과정에서 많은 문제가 발생하는 것으로 조사되었으며, 일본 도시쓰레기 RDF 제조공정은 건조 후 선별하고 성형하는 과정을 적용하고 있다.

RDF 제조공정을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

- (1) 선별과정 : 원료로 사용되는 폐기물을 RDF 생산에 알맞게 하고, 또한 사용 목적에 지장을 주지 않도록 유리, 금속 등의 불연물을 풍력이나 자력 혹은 인력으로 선별하는 과정
- (2) 파쇄과정 : 건조와 성형이 잘 될 수 있도록 원료의 크기를 균일하고 작게 파쇄 혹은 분쇄하는 과정
- (3) 건조과정 : 열풍과 같은 고온의 열원으로 원료속의 수분을 증발시키는 과정
- (4) 성형과정 : 선별, 파쇄, 건조공정을 거친 물질을 이용하기 위해 이동하거나 저장하기 편리한 형태로 성형하는 최종 단계

플라스틱이나 폐 목재와 같은 함수율이 낮은 폐기물의 RDF화 공정은 건조공정이 필요없으므로 비교적 간단해지는데 폐기물 성상에 따라 RDF화 공정은 달 라 진 다

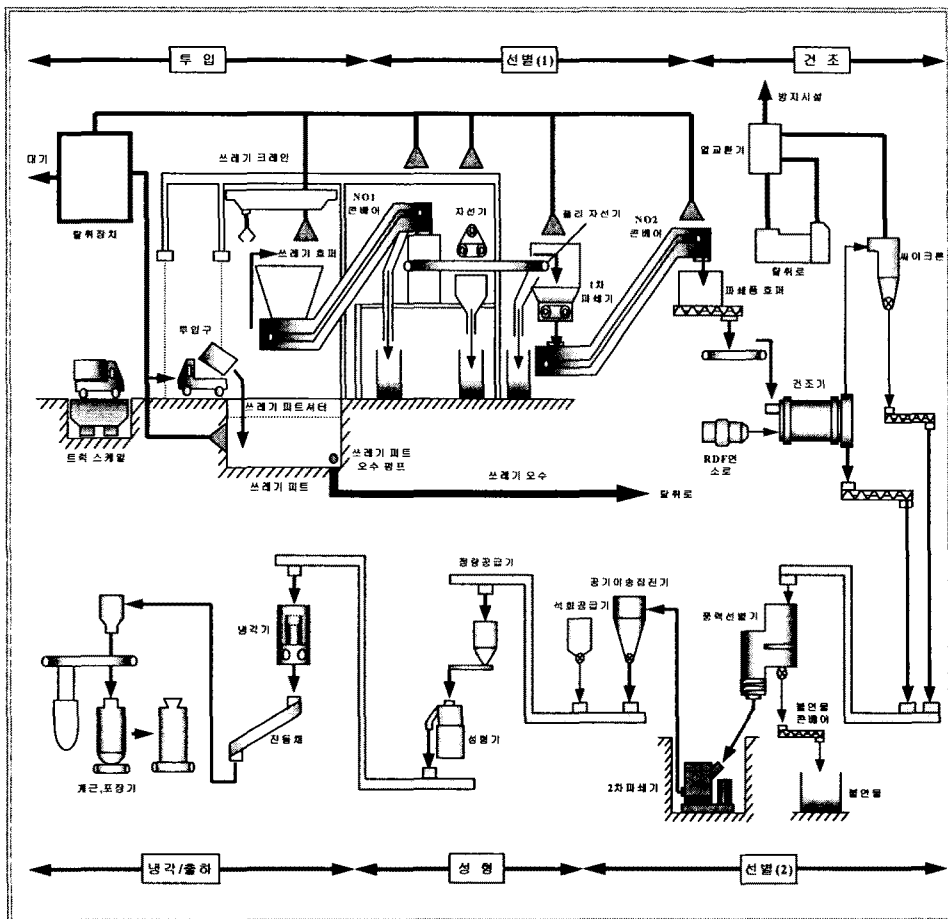


Fig 2.1 K-RDF 제조 공정도

4. RDF의 유동층 연소기술

폐기물의 연소기술은 크게 폐기물의 전처리 여부에 따라 mass burning과 RDF 연소기술로 크게 나눌 수 있다. 폐기물 소각로에 널리 적용되고 있는 mass burning 기술에서는 대형폐기물은 파쇄하고 일부 불연물만 제거한 후 수거 상태 그대로 연소로에 투입하는 기술이다. 그러나 RDF 연소기술에서는 수거된 폐기물을 여러가지 방법에 의해 불연물과 재활용 가능한 물질들을 분리 선별한 후 나머지 잔여물을 일정 크기의 RDF로 만들어 연소하기 때문에 연소 자체는 mass burning 보다는 쉽다고 할 수 있다. 그러나 RDF로 제조하여 연소하는 가장 큰 이유는 폐기물 자체의 처리보다는 폐기물로부터 열 또는 전기에너지를 회수하는 목적이 더 크기 때문에 에너지 회수효율이 높은 연소로의 선정 및 연소기술이 매우 중요하다. 현재 대형의 RDF 연소기술로는 이동식 화격자, 외부 순환유동층, 내부 순환유동층 등이 있는데 이들 기술중 유동층 연소기술을 적용한 폐기물발전시설의 현황과 대기오염물 배출문제 등을 살펴보았다.

가. 외부 순환유동층(External Circulating Fluidized Bed)

(1) 외부 순환유동층의 특징

순환유동층기술은 1970년 대부터 석탄화력발전소에 이용되기 시작한 기술로, 현재는 석탄화력발전소의 대표적인 기술로 전 세계적으로 보급이 계속 증가하고 있다. 국내에서도 1980년대 중반 이후부터 최근 동해화력까지 12기의 외부순환 유동층 석탄화력발전 및 보일러 설비가 설치되어 가동되고 있으며, 외부순환 유동층에 의한 설비의 설치를 검토중인 프로젝트가 계속 진행되고 있다. 이 기술의 가장 대표적인 특징은 일반 유동층보다 고속의 연소공기 속도에서 운전하므로 유동사가 비산하여 연소로를 이탈하여 Hot cyclone에서 포집되어 다시 연소로로 순환되는 과정에서 에너지를 회수하게 된다. 따라서 연소효율이 매우 높으며 열 에너지를 효과적으로 회수하여 발전에 사용할 수 있는 장점이 있다. Fig 2.2는 외부 순환유동층 보일러시스템을 나타내고 있다.

외부 순환유동층에 의한 RDF 연소설비에서는 RDF가 공기이송에 의해 연소로에 투입되어 연소되는데 고속의 연소공기에 의해서 연소로 내의 유동사가 격렬한 turbulent 상태를 유지하므로 연소로내 온도를 균일하게 유지할 수 있다. 또한 가스의 연소로내 체류시간이 기존 소각로 보다 3~4배 정도 증가하므로 3T의 효과가 매우 커서 연소효율이 기존의 97~98 %보다 높은 99 % 정도까지 달성이 가능하며 격렬한 유동에 의해 hot spot등이 방지되는 등 장점이 있다. 과잉공기비는 기존 RDF 소각방식의 70~80%보다 낮은 50%에서 연소하므로 연소로 밖으로 배출되는 미연소 카본을 1% 이하로 하여 보일러 효율을 86% 정도까지 높일 수 있다. 또한 연소온도가 기존 보일러보다 낮기 때문에 회재의 slaging

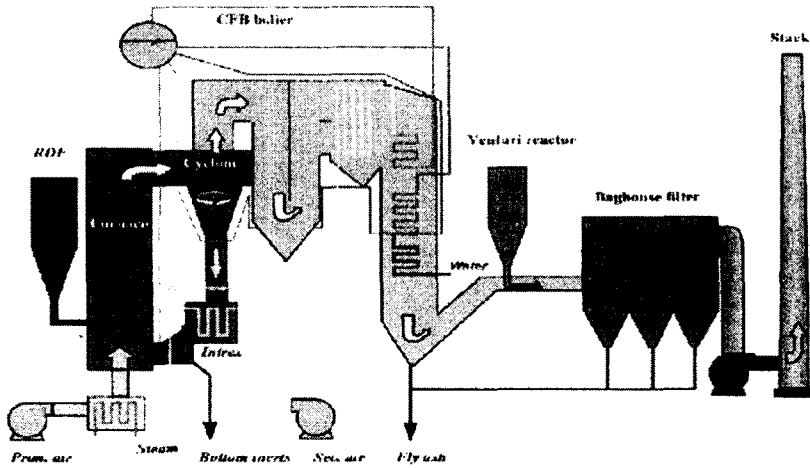


Fig 2.2 외부 순환유동층 RDF 연소시스템

및 fouling이 억제되고 고온에서 염소화합물에 의한 열교환 튜브의 부식이 줄어들며 NOx 발생이 감소하는 장점이 있다. 최근의 기술동향으로는 발전용 고압의 증기 생산시 과열기를 연소로 외부 Intergrated Recycle Heat Exchanger 이라는 INTREX에 위치함으로써 염소화합물 가스에 노출을 방지하고 다소 가스유속이 낮은 완화된 조건에서 유동층을 운전하므로 열교환 튜브의 부식 및 침식을 최소화할 수 있다.

(2) 상용화 설비 사례

Foster Wheeler의 기술에 의해 일리노이 Robbins에 지어진 외부순환식 RDF 유동층 연소시설은 96년 말부터 가동되기 시작하였다. 하루에 1,600톤의 생활폐기물로부터 5%의 유가금속과 20%의 유리 및 유기물이 제거되어 유입량의 75%인 1,200톤의 RDF가 생산되어 2개의 순환유동층 보일러에서 연소되며, 보일러로부터 208톤의 증기가 생산되어 50MW 용량의 발전기에 공급된다. CFBC에 사용된 RDF는 98%가 90mm 이하인 fluff 형태로 발열량은 약 3,400kcal이며 폐기물 1톤당 615kWh의 전력이 생산되어 발전효율이 약 21%에 상당한다. 시설 관련 내용은 다음과 같다.

- Licensor : Foster Wheeler Power Systems Inc.
- Location : Village of Robbins, Cook County, IL, USA, (11. 1996)
- Capacity
 - MSW : 1,600t/d (RDF 600t/d x Two CFBC Boilers)
 - Steam : 208t/h (443°C, 61kg/cm²g)
 - Power : 50MW x 1 Unit
- RDF
 - Size : Fluff, 98% less than 3.5 Inch

- Heating Value : 3,428kcal/kg
- Air Pollution Control : SNCR + SDR + Bag Filter
- Conversion Efficiency : 615kWh/ton MSW

Robbins plant와 매우 유사한 시스템의 플랜트가 최근 이탈리아 Romellina 에너지 리사이클링 Waste to Energy에서 가동되기 시작하였다. 이곳의 폐기물 처리량은 년 20만톤으로 하루 450톤 규모의 순환유동층 연소로와 17MW 급의 발전기가 설치되어 있다. 3개의 폐기물분리 및 RDF 생산라인중 2개 라인을 가동하여 하루 700톤의 폐기물로부터 유리 및 유기물, 유가금속을 분리하고 수분을 제거하여 60% 정도인 450톤의 RDF를 생산한다. RDF의 크기는 98%가 90mm 이하인 fluff 형태이고, 발열량은 약 3,000kcal로 에너지 전환율은 폐기물 1톤당 537kWh로 다소 낮아 보이지만 RDF 생성율이 60% 정도이므로 폐기물발전 효율은 약 25%에 상당한다. Romellina plant의 건설비용으로 총 1억 3천만 유로화(1,500억원)가 투입되었으며, Pavia 지방 96개 자치단체의 폐기물을 종합처리하는 시설로 운영되고 있다.

이 시설에 관련된 내용은 다음과 같다.

- Licensor : Foster Wheeler Italian
- Location : Lomellina Energia Recycling WTE Facility, Parona, Italy
- Operation : July, 2000
- Capacity
 - MSW : 200,000t/y (RDF 456t/d x 1 CFBC Boiler)
 - Steam : 83t/h (443°C, 62 Barg)
 - Power : 17MW x 1 Unit
- RDF
 - Size : Fluff, 98% less than 90 mm
 - Heating Value : 3,050kcal/kg
- Air Pollution Control : SDR + Bag Filter
- Conversion Efficiency : 537kWh/ton MSW

일본에서는 독일 Lurgi 기술을 바탕으로 미쓰비시중공업에서 개발한 외부 순환유동층 기술에 의한 RDF 시범발전소가 와카마쓰에 건설되어 운전되고 있는데, 하루 24톤의 RDF 연소용량에 0.6 MW급 발전설비이다. 이 설비의 특징은 중소 지자체의 폐기물을 Pellet 형태의 RDF로 만들어 한곳에 집중시켜 발전연료로 사용하는 체제로 폐기물을 폐기물 자체 보다는 연료의 형태로 이동한다는 점에서 사회적으로 폐기물처리시설 유치에 대한 거부감이 줄어들 수 있는 장점과 100기압 정도로 압력이 매우 높은 고압의 증기를 생산하여 발전 효율을 35%까지 높이고자 했다는 점에서 RDF 발전에서 매우 고무적인 사업이라고 할 수 있

다. 이렇게 압력을 높이는 경우 열교환 튜브의 고온부식 문제만 해결되면 30% 이상의 폐기물 발전효율 달성은 무난한 것으로 알려져 있다. Fig 2.3은 와카마쓰 플랜트 연소로 부분을 나타내고 있다.

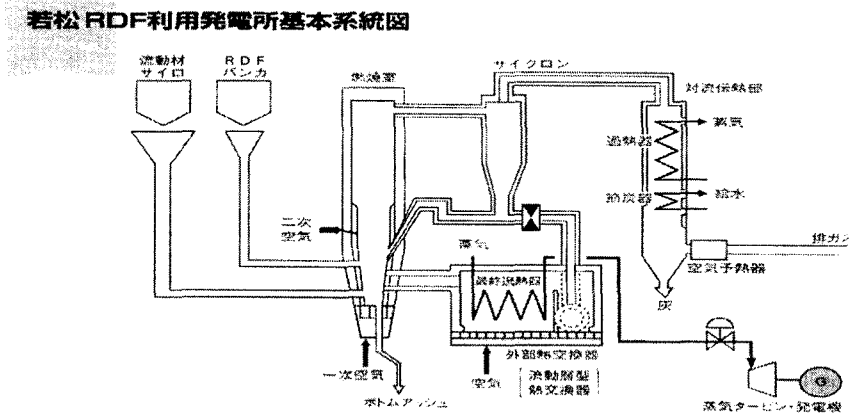


Fig 2.3 Wakamatsu 외부 순환유동층 RDF 연소시스템

전체 시스템은 타사의 경우와 유사한데 배기가스 처리시스템으로는 활성탄을 이용한 이동층(moving bed)를 활용하고 있다. 활성탄의 흡착기능을 이용하여 SOx 성분을 흡착처리한 후 배가스에 암모니아를 첨가하면 활성탄의 촉매기능에 의해 NOx가 분해되는 기술이다. 여기서는 배가스 중 다이옥신까지 흡착시킨 후 300℃ 정도의 가열가스를 이용하여 활성탄의 재생시 다이옥신은 열분해되어 제거되고, 탈착된 SOx, HCl, 중금속, 분진 등은 집진기에서 제거 또는 습식처리하는 방법이다.

외부 순환유동층의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- High Combustion Efficiency
 - Excellent combination of 3T
 - High gas residence time
 - Highly efficient cyclone
- High Boiler Efficiency : +81 %
 - Low excess air ratio
- Low Combustion Temperature : 829 ~ 913 °C
 - Reducing potential for ash slagging and tube fouling
 - Reducing high temperature chlorine corrosion
 - Lower NOx emission
- Stable Combustion
 - Thermal flywheel effect by large mass of inert particles

나. 내부 순환유동층(Internal Circulating Fluidized Bed)

(1) 내부순환유동층의 특징

내부 순환유동층기술은 원래 유럽에서 개발되었지만 일본에서 상용화기술로 완성되었다. 이 기술의 핵심은 분산판 중앙과 측면 부분에서의 연소공기 유속을 다르게 하여 연소로 내부에서 유동사가 자체적으로 순환되게 하는 기술이다. 가장 일반적인 내부 순환유동층 연소로는 RDF가 연소되는 combustion cell과 열회수를 위한 heat exchange cell로 나누어져 있어 다음과 같은 3개의 유동사 순환으로 특징지어진다.

- Combustion cell 내에서 moving part와 fluidized part간의 유동사의 순환
- Combustion cell과 heat exchange cell간의 유동사 순환
- 배기가스 cyclone으로부터 미연 탄소분의 combustion cell로 순환

기술선으로는 일본의 Ebara와 Kawaski 중공업 두 회사가 대표적인 회사로 기술을 보유하고 있는데 두 회사의 기본적인 원리는 유사하다. 다만 combustion cell과 heat recovery cell 사이에 격막을 Ebara는 1개 설치하였는데 Kawaski는 2개의 격막을 설치하여 형태에 있어서는 복잡하지만 열회수 지역에서 염소에 의한 부식을 최소화했다는 점에서 차이가 있다.

(2) 내부 순환유동층의 운전조업

내부 순환유동층 연소로에서는 Combustion cell의 중앙부분보다 측면에서의 공기유속을 매우 빠르게 유지함으로써 유동사 및 RDF가 cell 내에서 자체적으로 순환하게 된다. 즉 combustion cell의 양쪽 측면에 더 많은 공기가 유입됨에 따라 유동사를 격렬하게 유동화시키고 가열된 유동사 일부는 heat exchanger cell로 넘어가고 일부는 combustion cell의 중심부로 이동하게 된다. 또한 새로운 연료 RDF는 combustion cell의 중앙부로 투입되어 기존의 유동사와 함께 아래쪽으로 이동하는 moving bed 상태를 유지하게 됨에 따라 투입된 연료는 완전하게 분쇄, 연소하게 된다.

Heat exchange cell로 이송된 유동사는 RDF 연소에 의해 온도가 매우 높아진 상태이므로 열교환 튜브에 의해 열이 회수된 후 다시 combustion cell로 순환되게 된다. Heat exchanger cell의 유동화 공기유속은 최소유동화속도의 2배 이내 ($U/U_{mf} < 2$)로 일반적인 유동층 연소로의 3.5배보다 완화된 유동상태에서 운전하기 때문에 열교환 튜브의 침식을 최소화하면서 효율적으로 열회수가 가능하다. 또한 유동을 위한 공기도 염소성분이 없는 새로운 공기를 사용함으로써 고온에서의 부식도 최소화 할 수 있다. 열교환이 이루어진 후 유동사는 하부 통로를 통해서 다시 combustion cell로 순환하게 된다. 불연성 물질은 연소로 양 측면에서 배출되는데 유동사는 분리하여 다시 순환시키고, 분리된 불연물은 수분을 첨가하여 고형화시켜 폐기처리할 수 있다. Fig 2.4는 대표적인 내부 순환유동층 RDF 연소시스템을 나타낸 것이다.

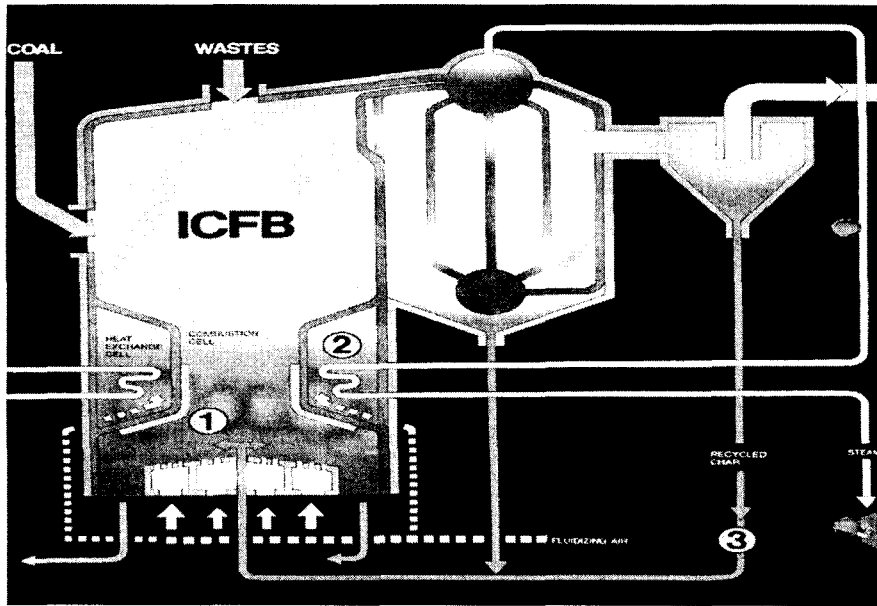


Fig 2.4 내부 순환유동층 RDF 연소시스템

내부 순환유동층에서는 유동사의 방대한 열보유량을 고려하면 거대한 heat sink를 갖고 있는 시스템으로 combustion cell과 heat extraction cell의 두 cell간의 가열된 유동사의 흐름량을 조절하여 열회수율을 조절할 수가 있다. 즉 연료 공급량을 줄이면서 heat extraction cell에 유입되는 공기량도 줄이면 combustion cell로 순환되는 유동사의 양이 줄어들게 된다. 결국은 heat extraction cell로 순환되는 고온 유동사의 양이 줄어들게 되어 combustion cell의 온도는 850 °C 정도에서 거의 일정하게 유지하면서도 증기생산량을 감소시킬 수가 있는 것이다. 연소온도 변화에 큰 영향을 주지 않고도 급격한 전환모드에서는 스팀 생산량의 60%, 느린 모드에서는 25%까지 turndown이 가능한 장점도 있다.

(3) 상용화 설비 사례

Ebara는 내부 순환유동층을 이용한 RDF 연소 및 에너지 회수설비를 Toyota 자동차에 적용한 실적이 있다. 원래 석탄 전용을 위한 내부 순환유동층 발전소였는데 자동차 생산공정에서 발생한 폴리프로필렌 주성분의 범퍼, 타이어, 기타 플라스틱등을 pellet 형태의 RDF로 만들어 석탄연료의 일부를 대체하였다. RDF는 직경이 1~3cm, 길이가 3~5cm이고, 산업폐기물을 이용한 RDF의 열량은 7,000 kcal/kg, 도시폐기물 RDF는 4,400 kcal/kg 정도인데 석탄의 50% 정도를 RDF로 대체했을 때 보일러 효율은 83~86%로 약 2% 정도 낮아졌지만 조업상의 문제점은 없었다.

이 시설 관련내용은 다음과 같다.

- Licensor : Ebara Corp.
- Location : Toyota Motor Corp., Fukuoka, 일본 (1988)
- Capacity
 - Fuel : Coal 94t/d + RDF 65~103t/d
 - Steam : 70t/h (460°C, 60Kg/cm²g)
 - Power : 16 MW x 1 Unit
- RDF
 - Size : 10~30mm Dia x 30~50mmL
 - Heating Value : P-RDF 7,062kcal/kg
M-RDF 4,430kcal/kg
- Air Pollution Control : Sorbent Injection + Bag Filter
- Boiler Efficiency : 83%

(4) 내부 순환유동층의 장단점

내부 순환유동층시스템의 장점은 RDF 연소부와 열회수부를 분리하여 열교환 튜브의 침식을 최소화하면서 효율적으로 열회수가 가능하다는 점이다. 특히 열회수부분에서는 유동을 위한 공기도 염소성분이 없는 새로운 공기를 사용함으로써 고온에서의 부식도 최소화할 수 있다. 1개의 본체를 연소부와 열회수 부분으로 분리함으로써 전체적으로는 설비가 콤팩트해지고 외부 순환유동층보다는 간단해 보이지만 실제로는 연소부 내부에 구조물이 설치되어야 한다는 문제점이 있으며 예상했던 것보다 부식이나 침식에 의한 문제도 상당하므로 기술적으로 해결해야 할 점도 많은 것으로 지적되고 있다. 또한 아직은 상용화 실적이 적어 객관적으로 기술적인 비교평가를 하기도 쉽지가 않다.

- Minimal Erosion of Heat Extraction Tubes
 - Placement of heat extraction tubes in the gentler environment of the heat exchanger cell
- Higher Turndown Ratio
 - Ability to control the flow of hot sand between combustion and heat exchange cell
 - Rapid turndown to 60% of steam production (or slow turndown 25%) with little impact on bed temperature
- Very Efficient Combustion and Heat Recovery
 - Integration of three types of circulation
 - In-bed heat extraction tubes and controllability to energy production
- Easily Extraction of Non-combustibles

5. RDF 연소에 따른 대가오염 방지기술

RDF의 유동층 연소는 일반적으로 기존 타 연소방식의 소각로 보다 대기오염물 생성이 적다고 알려져 있으며, 실제로 운전되고 있는 설비를 보더라도 배출농도가 낮게 나타나고 있다. 그리고 일반적인 폐기물소각로 보다 폐기물을 RDF 형태로 만들어 연소하면 대기오염물 배출이 적은 이유는 크게 다음과 같은 주요 요인 때문이라고 알려져 있다.

가. 황산화물(SO_x)

RDF 제조시 부패방지의 목적 및 황이나 염소성분을 중화시켜 산성가스로 배출되는 것을 억제하기 위해서 Ca성분을 첨가한다. RDF의 연소과정중 Ca성분에 의해 원료중 황성분이 CaSO₄로 고정화되어 회재로 제거되기 때문에 배가스로 배출되는 SO_x 농도가 낮아지게 된다.

나. 질소산화물(NO_x)

RDF 제조과정 중에서 성형압출시 고압에서 온도가 올라가게 되는데 이때 질소성분이 암모니아와 반응하여 분해됨으로서 Fuel NO_x가 크게 저감된다고 알려져 있다. 또한 펠렛 형태의 RDF를 연소하는 경우 유동층 연소로가 가장 적합한 것으로 알려져 있으며, 유동층 연소로는 최근 석탄보일러에 적용이 많이 되고 있는데 조업온도가 상대적으로 낮기 때문에 thermal NO_x 발생량이 적어진다. 따라서 RDF 제조 및 유동층 연소로 기술을 적용하는 경우 전체적으로 NO_x 배출농도가 낮아지게 된다. 순환된 char는 연소로 내에서 촉매 및 환원특성에 의해 질소산화물을 상당부분 분해함으로 NO_x 배출농도가 25% 이상 감소된 150ppm 이하로 줄어들었다는 연구보고도 있다.

다. 염화수소(HCl)

RDF 제조시 첨가된 Ca성분은 Cl성분과 반응하여 CaCl₂로 고정화되므로서 고형물로 제거할 수가 있다. 또한 RDF는 폐기물을 건조하여 만든 것으로 수분함량이 10% 정도로 낮기 때문에 850℃ 정도에서도 기상의 HCl 보다는 고형의 CaCl₂로 존재하는 경향이 높아서 배기가스로 배출되는 HCl 농도는 크게 낮아지게 된다.

라. Dioxin

쓰레기 소각과정에서의 다이옥신 생성은 연소과정에 일어나는 것과 연소 후처리 과정에 일어나는 것이 있다. 300~500℃의 분위기에서 분진 중의 중금속(염화동 등)이나 미연탄소 등에 의한 촉매반응에서의 합성, 즉 PVC 등의 열분해시 생성되는 클로로포름, 클로로페놀과 같은 다이옥신 전구물질이 미연탄소와 같은 비산재의 표면에서 Cu, Fe 등에 의한 촉매반응으로 최종적으로 다이옥신이 생성되는 'De-novo synthesis'라고 불리는 화학반응 과정이 소각로에서 가장 중요한 다이옥신 생성경로로 알려져 있다. 그러나, RDF는 연소될 때 상대적으로 다이옥신생성이 매우 적은 것으로 알려져 있는데 이와 관련된

인자들을 항목별로 살펴보면 다음과 같다.

- 폐기물 성상

폐기물 수분함량은 다이옥신 배출과 깊은 상관관계를 보이는데 이것은 수분과 과잉공기(즉, 산소농도)가 화염온도를 결정하는 주요 요인이기 때문이고, 수분함량이 높으면 온도와 산소농도 모두가 떨어지는 경향을 보이므로 궁극적으로는 효과적인 연소를 달성할 수 없게 된다. 그러나, RDF는 수분을 제거하는 건조공정과 불연물을 제거하는 선별공정을 거쳐서 제조되어 불완전연소 요인이 사전에 제거되므로 연소시 다이옥신 생성량이 크게 줄어든다.

- 연소조건

다이옥신이 생성되지 않도록 하기 위해서는 완전연소를 위한 온도, 혼합, 체류시간 등의 3T 조건이 중요한데 이를 위해서 유럽공동체 지침에서는 850℃의 온도, 소각로 형상 개선과 2차공기 주입에 의한 난류개선, 체류시간 2초를 요구하고 있다. 이렇게 함으로써 클로로포름과 같은 다이옥신 전구물질의 생성방지와 비산재인 미연탄소를 줄일 수 있기 때문이다. RDF는 수분이 10% 이하이므로 연소시 연소실 내부 전체가 고온 분위기가 되고, 둘째로 RDF는 동일한 형상으로 성형되어 있어서 연소실 내로 투입되면 일반폐기물과 달리 일정한 공극이 형성되므로 연소공기의 흐름이 원활하여 가연성분과의 혼합이 균일해지며, 셋째로 연소실 내에서 RDF로부터 기화되어 나오는 가연가스의 분포가 균일하여 부분적 불균일이 존재하는 일반 소각로와 비교할 때 동일한 연소실 체적으로도 충분한 체류효과를 갖는다.

- 배기가스 상태

폐기물 중의 염소원 중에서 NaCl과 같은 무기염보다는 반응성이 좋은 HCl이나 Cl₂가 다이옥신생성에 더 중요한 역할을 하는데 PVC가 열분해되면서 HCl이 생성되는 경로가 특히 중요한 것으로 알려져 있다. RDF 연소배기가스 중에는 첨가제로 사용되는 석회성분에 의해 HCl 성분이 CaCl₂ 형태로 중화되어 제거되므로 원천적으로 다이옥신의 생성량이 적어진다. 또한 배기가스 중의 CO와 다이옥신의 상호관계가 있다는 연구도 있어 일본은 CO농도를 50ppm 이하로 권장하고 있으며 국내도 2005년부터 CO 배출허용기준을 50ppm(6% 산소농도 기준) 이하로 규제할 예정이다. CO는 불완전연소시 다량 발생하므로 연소제어가 용이한 RDF가 다이옥신저감에 유리하다.

- 조업상태

폐기물 소각시 운전시작과 정지과정에서는 비정상 조업상태가 되어 다량의 다이옥신이 발생하는 것으로 알려져 있어 가능한 한 연속운전을 하는 것과 비정상운전 시간의 단축이 중요하다. 그러나, RDF는 연료비(고정탄소/휘발분)가 0.12~0.19 정도로 휘발분이 매우 많아서 연소하기 쉽고 점화온도도 230℃ 정도로 낮기 때문에 RDF 연소로의 가동시작부터 정상온도 도달까지의 시간이 짧다. 따라서 다이옥신이 발생하기 쉬운 비정상 조업시간이 짧아지며 또한 정

지 시에도 RDF는 함수율이 10% 이하이므로 소화시간이 짧아져 비정상 조업 시간이 단축된다.

- 연소실 형상

일반적으로 폐기물을 소각시킬 때 연소실 공간 내부에서의 가스 혼합이나 열전달분포와 같은 연소조건이 불균일하면 다이옥신이 발생되므로 균일한 연소조건을 만들기 위해서는 배연가스의 유동에 관한 유체역학적 거동을 최대한 고려해서 설계하지 않으면 안되는 어려움이 있다. 그러나, RDF는 전술한 바와 같이 휘발분이 많고 수분이 적어서 양호한 연소조건을 가지고 있으므로 연소실의 형상에 영향을 적게 받는다.

다음 table 2.6은 일본에서 실제로 미에현의 일반생활폐기물로 생산한 RDF를 연소시킬 때 배출되는 다이옥신농도를 3회 시험하여 측정한 평균값이다. 이 연구에서는 백필터에서의 다이옥신 제거율이 평균 93.1%로 보고하고 있으며, 특히 No.1 실험의 결과 등가독성(TEQ)이 강한 4염화물의 제거율이 80% 이하로 나타났다. 그래서 No.2 와 No.3 실험에서는 백필터 전단에 단순한 공냉관을 설치하였고, 그 결과 4염화물의 제거율이 97%로 개선되었다고 보고하고 있다. 이 실험에 사용한 연소로는 150kg/hr급 스톡아식 연소로서 후처리장치는 싸이클론과 백필터만을 부착하였다.

Table 2.6 스톡아식 연소로에서의 RDF 연소시 다이옥신류의 농도

시험	CO 농도 변화 (ppm)	평균 (ppm)	다이옥신류 농도(ng-TEQ/Nm ³)	
			백필터 입구	백필터 출구
No.1	31 ~ 76	54	12	2.0
No.2	25 ~ 84	51	15	0.2
No.3	0 ~ 59	15	11.9	0.002

또 다른 연구보고서는 130kg/kr급의 순환유동층 연소로를 이용해서 RDF 연소실험을 하였는데 그 결과는 table 2.7과 같다. 순환유동층 연소로는 후처리 설비로 백필터만을 설치하고도 좋은 결과를 얻을 수 있었으며 특히 외부 순환 유동층연소로가 RDF연소에 좋은 성능을 나타내고 있는 것은 주목할 만하다.

Table 2.7 순환유동층 연소로에서 RDF연소시 다이옥신류 농도

항 목		단 위	A	B	C	D	E
연소방식			외부순환	내부순환	외부순환	내부순환	내부순환
연 료			카트렐 RDF	카트렐 RDF	RMJ RDF	RMJ RDF	카트렐RDF + 석탄20%
다이옥신 농 도	백필터입구	(ng-TEQ /Nm ³)	0.59	11.05	0.38	4.61	5.96
	백필터출구	(O ₂ =12%)	0.013	-	0.008	0.18	0.2