

폐기물 고형연료(RDF)의 에너지 이용을 위한 연소기술 개발

김우현(金宇顯)

한국기계연구원

A Study on Combustion Technologies for Energy Reuse of Refuse Derived Fuel(RDF)

Woo-Hyun Kim

*Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343,
KOREA*

[†]Tel : 042-868-7497 , E-mail : kwh0788@kimm.re.kr

1. 서론

국가경제의 발전에 기본적 요소가 되는 에너지자원의 확보는 어느국가를 막론하고 가장 중대한 관심사의 하나가 되고 있다. 또한 에너지문제는 환경문제와도 밀접한 관계를 가지고 있으므로 전 세계가 합심해서 공동으로 해결해야하는 문제이기도 하다.

우리나라의 경우 대체에너지는 '대체에너지개발 및 이용보급촉진법'에서 '태양에너지, 바이오에너지, 풍력, 소수력, 연료전지, 석탄을 액화·가스화한 에너지, 해양에너지, 폐기물에너지, 기타 대통령령으로 정하는 에너지'로 정의하고 있다. 우리나라의 대체에너지 비율은 2000년 현재 1.04%로서 OECD국가의 약 4%에 비해 매우 적은 편이므로 정부는 2006년까지 2%까지 증가시키는 목표를 수립하였다. 여러가지 대체에너지원 중에서 폐기물에너지는 국내 총 대체에너지의 90% 이상을 차지하며 대체에너지 공급에 절대적인 기여를 하고 있는 것으로 나타났다. 아직도 70% 이상의 폐기물에너지가 잠재된 것으로 추정되므로 폐기물에너지의 적극적인 활용여부가 향후 대체에너지정책의 성공에 중요한 역할을 할 것으로 보여진다. 폐기물에너지의 적극적인 활용을 위해서는 철저한 가연성 폐기물에너지의 회수가 필요한데 아직까지도 70% 이상이 단순 소각이나 매립되고 있고, 특히 중소도시에서 발생하는 가연성폐기물은 소량이므로 안정적 공급과 수요처 확보가 어렵고 따라서 많은 중소도시자체가 단순 소각이나 매립처리로 폐기물에너지를 낭비하고 있다. 그러나 주변의 중소도시에서 자체의 가연성폐기물을 수송과 저장이 용이하며 석탄과 비슷한 열량을 지닌 폐기물 고형연료(Refuse Derives Fuel, 이하 RDF)로 만들어서 대형의 에너지 수요처로 이송하여 연료로 사용하면 폐기물에너지 회수를 극대화 할 수 있다.

한편, 폐기물은 처리의 측면에서 환경문제와도 직접적으로 관계되므로 반드시 '환경친화적인 폐기물에너지 회수'가 가능한 기술을 개발하여 보급하는 것이 필요하다. 선진국에서는 이미 RDF 기술을 이용하여 에너지 확보 및 환경보전 효과를 동반할 경우에 발전단가는 50~60원/kWh 정도로

서 태양력이나 풍력 발전보다 매우 저렴한 것으로 나타났다. 현재 국내에서 RDF 제조기술은 꾸준한 기술개발로 사업화가 가능한 수준에 도달해 있으며 상용플랜트 건설이 몇 곳에서 검토단계에 있다. 그러나 환경친화적인 RDF 수요처가 없어서 RDF 에너지의 보급이 지연되고 있으므로 적절한 해결책이 시급한 실정이다.

에너지관리공단에서는 대체에너지기술개발 사업의 하나로 RDF의 대체에너지 연료화에 따른 RDF에너지의 보급화에 많은 노력을 기울이고 있으나 RDF 자체가 폐기물을 원료로하여 만들어지므로 환경부의 폐기물 관리정책과 근본적으로 연계가 되어지기 때문에 환경부에서 RDF를 고형연료로 인정하여야 RDF의 제조나 보급의 활성화가 이루어질 수 있으나 환경부 역시 전체 생활계 및 사업장폐기물의 관리정책과도 맞물려 있기 때문에 선불리 RDF를 고형연료로서 인정하지 못하고 기술적인 측면과 환경적인 측면 등에서 조심스럽게 접근하고 있다. 하지만 최근 국제원유가가 급등하여 대부분의 에너지자원을 수입에 의존하고 있는 우리의 실정을 감안할 때 멀지 않아 RDF를 고형연료로서 인정하게 될 날이 곧 올 것으로 예상되며 그때를 위하여 다양한 연소설비를 이용한 RDF를 연료로 하는 연소기술의 개발이 활발하게 이루어져야 할 것이다. 따라서, 본 연구는 여러 종류의 연소설비에서 RDF를 소각하여 RDF의 연소 및 배출 특성을 비교, 분석하고 각각의 RDF 연소설비에 대한 보다 깊은 연구의 기초 자료로 활용하자고 한다.

2. 폐기물 소각로의 종류 및 특성

2-1 화격자식 소각로

화격자연소방식은 피소각물이 화격자위에 놓인 상태에서 연소 단계별로 피소각물이 전진하면서 화격자 하부로부터 공급되는 연소공기에 의해 연소가 진행되는 방식이다. 이 화격자 연소방식은 연소로 내에서의 폐기물 이송 및 연소를 위한 화격자의 구동 등으로 인하여 폐기물의 일괄투입이 가능하며, 다른 형태의 소각로 보다 소각용량이 크고 최소한의 전처리 만으로 소각이 용이하다. 대규모로 발생하는 도시폐기물 소각에 많이 이용되고 있다. 화격자는 일반적으로 급진설비로부터 공급받은 폐기물을 건조시키는 건조부, 건조된 폐기물이 고온의 분위기에서 환원 및 산화반응이 일어나는 연소부, 열분해속도가 늦은 물질을 완전히 연소시키는 후연소부의 세부분으로 구성된다. 건조부에서는 로내의 고온의 연소가스 복사열에 의한 건조, 가열된 연소가스에 의한 통기 건조, 소각중인 폐기물과 바로 투입된 폐기물의 혼합에 의한 연소건조 등이 복합적으로 일어난다. 도시폐기물의 경우에는 40-60%의 수분을 함유하고 있어 이 건조부에서 착화온도에 이르도록 건조하여야 하므로 가급적 고온가스와 접촉이 잘 이루어지도록 하고, 가스와 폐기물 사이의 거리를 가깝게 유지하여야 하며 폐기물의 표면적이 크도록 하여야 한다. 도시폐기물의 소각시에는 완벽한 연소를 꾀하여 소각재의 양을 최소화하고 연소가스에 의한 2차 환경오염을 최소화하여야 한다. 이를 위해서는 폐기물의 성상에 따라 화격자의 형태, 연소실의 형상, 연소공기량과 공급방법, 연소조건(온도), 피소각물의 이송 및 혼합방법 등을 충분히 고려하여야 한다.

2-2 유동층 소각로(Fluidized Bed Incinerator)

유동층 소각로 내부는 유동화부와 연소부(freeboard)로 구분되어 진다. 유동층내에 유동사를 일정하게 충전시킨 후 다공형 공기분산장치를 통하여 유동화공기를 주입하면 유동사는 유동층을 형성하게 된다. 보조버너로서 이 유동층 소각로 내부 전체를 가열하여 충분한 연소반응이 일어날 만큼 고온으로 유지시킨 후 유동상태에 있는 층 내부로 일정한 크기 이하로 파쇄한 폐기물을 투입한다. 투입된 폐기물은 로내의 축열과 유동사의 교반효과에 의하여 짧은 시간동안 건조, 착화, 연소가 일어나게 된다. 그리고 연소의 일부는 유동층 상부의 연소부에서 일어나게 된다. 이와같이 유동층 연소법은 화격자식 소각로에 비하여 연료의 종류에 대한 제약이 작고 저위발열량의 연료도 효과적으로 연소가 가능하며 연소온도가 균일하고 높은 열전달계수로 인하여 장치를 소형화할 수 있으며 비교적 낮은 온도(800-900℃)에서 연소하므로 NOx의 발생량이 적고 석회석과 같은 흡수제를 피소각물과 함께 주입하면 SOx, HCl 등과 같은 가스상 오염물질도 별도의 후처리장치를 설치하지 않고 제거가 가능하다. 점차 발생량이 증가하고 있는 하.폐수슬러지 및 액상폐유나 폐유슬러지 같은 비교적 연소가 어려운 물질들의 효과적인 소각을 위해서는 유동층 소각이 타 소각법에 비하여 여러 가지 면에서 유리한 측면이 많다. 반면 반드시 소각 대상물의 일정한 크기 이하로 파쇄하여야 한다거나 미세입자의 비산유출에 의한 입자상오염물질의 부하가 크다는 단점도 가지고 있으나 최근에는 다양한 전, 후처리기술의 개발로 이러한 단점들이 대부분 보완되어 많은 설비들이 보급되고 있는 실정이다.

3. 각종 연소설비를 이용한 RDF의 연소실험

3-1 RDF/RPF 특성분석

3-1-1 RDF/RPF의 특성

생활폐기물로 제조한 RDF와 RPF의 성상, 밀도, 원소조성 및 공업분석, 발열량 등을 측정하였고 그 결과는 Table3-1, Table3-2와 같다.

Table 3-1 Property of RDF used in the experiments.

Contents of wastes(%)		Ultimate analysis(%)		Proximate analysis(%)	
paper	53.83	C	50.26	Moisture	3.99
plastic	40.26	H	7.72	Volatile matter	79.04
wool	2.62	O	30.50	Fixed carbon	6.99
wood	1.04	N	0.75	Ash	9.98
rubber	1.85	S	0.02	total	100
etc	0.4	Density	0.9	Calorific value	4,969
total	100	(g/cm ³)		(kcal/kg)	

Table 3-2 Property of RPF used in the experiments.

Ultimate analysis(%)		Proximate analysis(%)	sample1	sample2	sample3
C	58.36	Moisture	1.28	1.03	0.92
H	7.20	Volatile matter	92.69	86.55	87.57
O	24.64	Ash	6.03	12.42	11.51
N	1.10	건고위발열량(kcal/kg)	7,535	6,966	7,608
S	2.60	습고위발열량(kcal/kg)	7,439	6,902	7,530
Total	100.0	습저위발열량(kcal/kg)	7,431	6,896	7,523

※ RPF(Refuse Plastics Fuel)

3-1-2 RDF/RPF의 TG 분석

Fig.3-1은 RDF와 RPF의 TG 분석한 결과이다. 다소 마지막 부분에서 에러가 발생하였으나 전체적인 경향은 RDF나 RPF 모두 약 300~350°C에서 열분해되기 시작하였다.

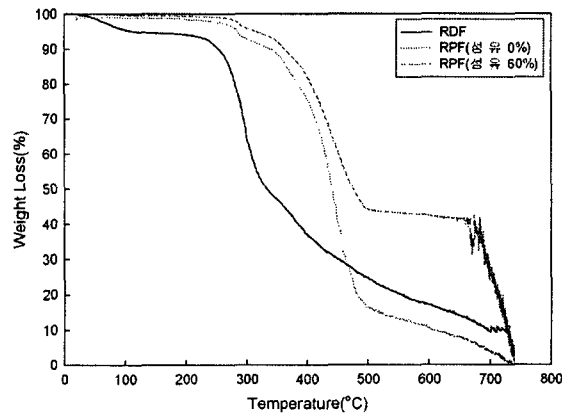


Fig. 3-1 RDF/RPF TG analysis.

3-2 RDF 연소실험

3-2-1 기포유동층 연소설비를 이용한 연소실험

가. 연소설비 구성 및 실험방법

기포유동층 연소설비의 주요장치는 유동층 연소로 본체, 연료 공급장치, 공기 공급장치, 회재 포집장치, 온도 및 압력 측정장치 등으로 구성되어 있다. 유동층 소각로 본체는 스테인레스 스틸(SUS-316)관으로 제작하였다. 연소로 상·하단부의 내경은 각각 300mm, 200mm로 상단이 100mm 확장되는 형태로 상단 free board부에서 비산분진의 체류시간이 증가되도록 제작되었으며, 하단의 높이는 공기분산판으로부터 970mm, 상단부의 높이는 1,567mm이며 하단 plenum chamber 부분은 217mm로 유동층 연소로의 전체 높이는 2,754mm이다. 연소로 온도분포를 측정하기 위하여 K-type 열전대를 반응기 높이별로 설치하여 연소로 내의 온도를 파악하여 온도의 변화가 없는 정상상태에서 배출가스등을 분석할 수 있도록 하였다. 연소로 내부 층물질의 유동화상태 파악 및 층높이

조절을 위해 bed 하부와 상부의 차압을 U-tube manometer로 측정하였다. 그리고 유동층 연소로 하단과 상단에 냉각수 순환용 10mm 스테인레스 튜브를 3열씩 감아 연소온도를 조절하도록 하였다. 또한 RDF연소를 위하여 필요한 유동층 연소로의 온도를 승온하기 위한 보조 연료로 LPG를 사용하였으며 LPG는 유동층내의 공기분산판으로 부터 100mm 상부로 공급하였다. 유동층 연소시 주입하는 RDF의 정량 투입을 위해 rotary valve를 이용하였다. 또한 로내의 회재는 공기분산판 중앙에 설치된 하부 배출관을 통하여 배출하였으며, 연소배가스에 함유된 비산재를 포집하기 위하여 두 개의 접선 유입식 싸이클론을 직렬로 연결하여 설치하였다. 연소공기는 compressor에서 나온 공기를 유량계로 조절하여 정량 공급하였고, 유동층 연소로의 승온시에는 heater를 이용하여 유동화공기를 200℃로 예열하여 보조연료로 주입되는 LPG를 착화시키는데 유리하게 하였다.

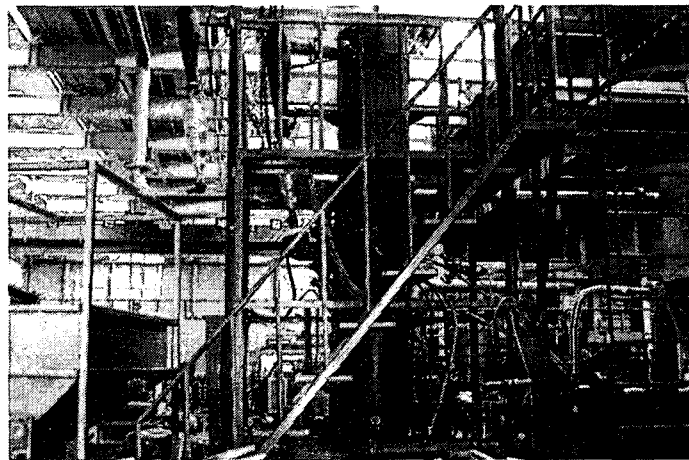


Fig. 3-2 Bench scale RDF fluidized bed combustor.

나. 실험결과 및 고찰

유동매체(주문진 규사 4호, 0.6mm) 13kg을 로내에 주입한 후 1차 공기를 공급하여 층을 유동화시키고 LPG용 버너를 이용하여 착화, 승온시켜 유동층 온도가 약 400℃이상이 되면 LPG를 공급하여 RDF가 연소될 수 있는 온도(약600℃)까지 승온시켜 RDF를 주입한다. RDF를 주입하여 노내의 온도분포가 안정화되는 정상상태에 도달하게 되면 최적 연소조건을 찾기 위해 시료투입량, 1, 2차 공기공급량을 변화시켜 온도분포, 배가스농도 등을 측정하였다. 실험조건은 Table3-3과 같다.

Table 3-3 Experimental conditions of RDF combustion in stable state.

RDF feeding rate(F_o)	3kg/hr, 4kg/hr, 5kg/hr
Gas velocity(U_o)	1.0m/s, 1.1m/s, 1.2m/s
Second air rate	100 ℓ/min, 200 ℓ/min, 300 ℓ/min, 400 ℓ/min

Fig.3-3은 bed층의 온도를 880-900℃로 유지하면서 RDF 투입량을 3, 4, 5kg/hr로 했을 때 free board부의 온도 분포를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이 투입량이 3kg/hr일 때 free board부의 온도는 약 700℃ 정도였고 투입량을 4kg/hr로 증가시켰을 때 900℃ 까지 상승하였으나 시간이 지나

면서 800도씨 부근에서 안정화되었다. 그리고 투입량을 5kg/hr으로 투입했을 경우엔 약 900℃ 부근에서 안정화되는 것을 볼 수 있다. RDF는 휘발분이 많아 freeboard부의 온도가 낮게 되면 미연가스의 완전연소가 이루어지지 않아 HCl, CO, SO_x 등 배가스의 농도가 높아질 가능성이 커진다. 따라서, 미연가스의 완전연소가 이루어지기 위해서는 free board부의 온도가 850℃ 이상 유지하는 것이 중요할 것으로 판단되어 적정투입량을 5kg/hr로 결정하였다.

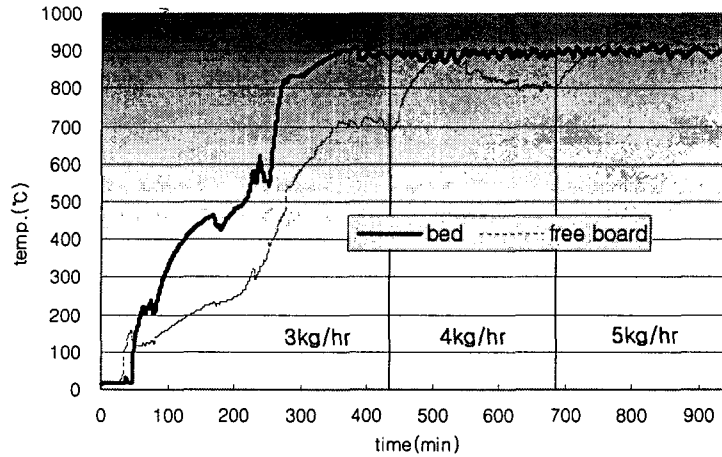


Fig.3-3 Temperature distribution with feeding rate in stable state.

Table 3-4는 투입량, 공기공급량에 따른 배가스 농도를 나타낸 것이다. 투입량이 3kg/hr일 경우엔 free board부의 온도가 낮기 때문에 공기공급량에 상관없이 배가스의 농도가 상당히 높았고 4kg/hr일 경우엔 공탑속도 $U_o=1.1$, 2차공기 200, 300 ℓ/min일 때 배가스의 농도가 비교적 낮았으며 5kg/hr 일 경우엔 $U_o=1.2$, 2차공기 300, 400 ℓ/min일 때가 가장 연소가 잘 이루어지는 것으로 나타났다. 결론적으로 RDF의 유동층 연소의 최적연소조건은 free board부의 온도가 충분히 상승할 수 있도록 투입량을 5kg/hr로 하였으며 그때의 공탑속도 1.2m/s, 2차연소공기 300-400ℓ/min으로 운전하는 것이 가장 좋을 것으로 판단되었다.

Table 3-4 Concentration of exhaust gases.

feed rate	1st air(ℓ/min)	2nd air(ℓ/min)	Gas conc.(ppm), O ₂ (12%)		
			CO	NO	SO ₂
3kg/hr	U _o =1.2m/s (1st=575)	-	965	218	31
		100	375	216	20
		200	163	241	15
		300	214	252	11
4kg/hr	U _o =1.2m/s (1st=575)	-	951	164	124
		200	94	184	10
		300	184	185	12
5kg/hr	U _o =1.2m/s (1st=575)	-	459	202	34
		100	354	194	5
		200	95	184	3
		300	24	189	1
		400	35	205	1

3-2-2 순환유동층 연소로를 이용한 연소실험

가. 연소설비 구성 및 실험방법

순환유동층 연소설비의 구성은 RDF feeder, RDF를 연소시키는 연소로(combustor), 증기발생부(steam generator), 미연분을 회수하여 다시 연소로에 투입하는 hot cyclone 및 seal port 그리고 연소공기를 예열하기 위한 air preheater로 구성되어 있으며, 연소로의 내벽에 전열관(heating Tube)이 설치하였으며 공정도를 Fig3-4에 나타내었다. 연료 및 연소회재는 연소로, 사이클론 및 loop seal의 순서로 순환하며 연소로에서 일정량의 연소회재가 연소로 외부로 배출되게 된다. 연소공기는 air preheater에서 예열되어 연소로의 분산판으로 공급하였으며, 운전조건에 따라 2차공기를 연소로 상부인 free board부에서 최대 30%까지 공급하였다.

연소로에 정체층 높이인 0.4m의 절반인 0.2m 정도 층물질(주문진규사 4호)을 채우고 최소유동화 상태로 공기를 공급하였다. 온도, 압력, 유량을 표시하는 계측기기들을 가동시키고, 모든 자료는 computer를 통하여 실시간으로 data logging되도록 하였다. 일정 유량의 유동화공기를 분산판을 통해 공급하여 free board부 압력을 대략 -10mmAq 정도의 음압으로 유지하였다. 유동공기량을 서서히 증가시키면서 층내 압력강하를 확인하여 최소유동화 속도로 운전하였다.

유동층의 온도를 RDF의 발화점인 480℃ 이상으로 예열하기 위해 분산판 전단에 LPG 버너를 연결하여 연소공기를 600℃ 이상으로 증가시킨 후 공급하고 송풍기의 유량을 조절하여 공탑속도를 일정하게 유지하였다. 480℃ 이상으로 층물질의 온도가 상승하면 RDF를 공급하였다. 온도기록계를 통하여 착화여부를 확인한 후, 서서히 연료량을 증가시켰으며, 소각로의 온도가 상승하면 LPG 버너 가동을 중단하고, 연소용 송풍기만으로 공기를 공급하였다. 점화 후 층물질인 모래를 정체층 높이인 0.4m까지 서서히 투입하였다. 한편, 증기를 생산하기 위해서 설치한 열회수용 tube(이중관, 25A*180)에 소량의 물을 연속적으로 공급하였다.

연소실의 온도 분포는 RDF 공급량을 30kg/hr로 고정하였을 때, 800~950℃로 유지할 수 있었다. 온도분포가 안정화되면 연료량, 공기비, 공탑속도 등의 운전조건을 바꿔주면서 온도분포, 고체순환량, 배가스분석 등을 측정하였다. 연소실 bed 부분과 여과집진기 전단의 과열을 방지하기 위해서 water jacket에 물을 공급하였다. 열회수용 tube에는 일정량의 물을 공급하여 증기의 발생량과 온도를 측정하였다.

나. 실험결과 및 고찰

① 유동층 연소로 내 온도 및 압력 분포

운전 조건에 따른 유동층 연소로 내 온도 분포를 그림 3-5에 나타내었다. 유동층의 초기 승온을 위해서 보조버너(LPG)를 사용하였다. 보조 버너에 의해 600 ~ 800 ℃로 가열된 공기는 분산판을 통하여 유동층으로 인입하였다. 유동공기가 일정온도 이상 가열되면서 공탑속도가 증가되면, 유동이 더욱 원활하게 이뤄진다. 본 실험에서는 운전시작 50분이 지나면서 활발한 유동층 혼합으로 bed 상부 온도가 급속하게 상승하는 경향을 나타내었다. 유동사가 RDF의 착화온도인 450℃에 이

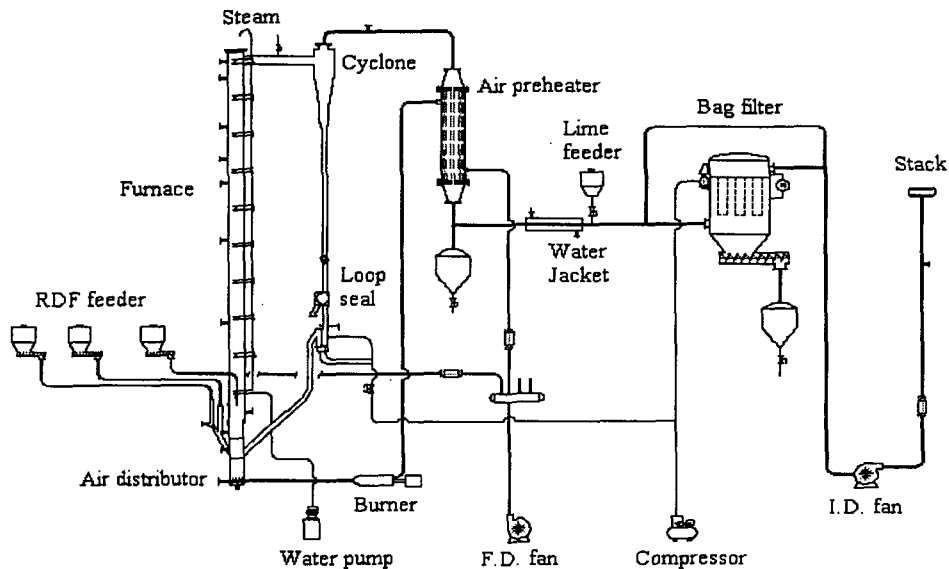
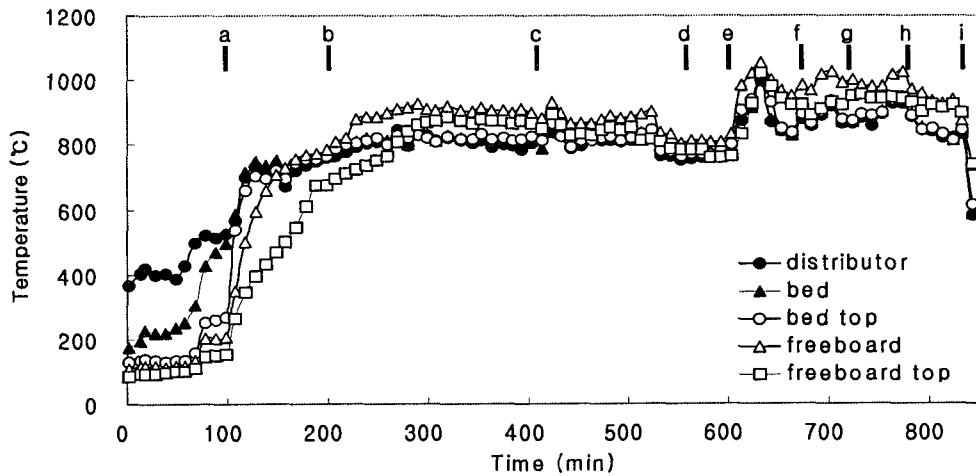


Fig. 3-4 Schematic diagram of CFBc pilot plant for RDF combustion.

이르면(a), 보조버너의 가동을 중단하고 RDF를 10kg/hr로 공급하였다. RDF는 가열된 유동사와 혼합되어 빠르게 연소반응을 일으켰으며, 결과적으로 bed의 온도는 800°C 정도에서 안정된 모습을 나타내었다. Free board부의 경우 연소 초기에 다소 느린 온도 상승을 나타내지만, 연소조건이 안정화되고, 연소로 내부가 예열되면서 서서히 bed의 온도를 초과하는 경향을 나타내었다. 이는 RDF의 휘발성물질이 free board부에서 연소하기 때문으로 사료된다. 유동층의 온도가 안정적으로 유지되면, RDF의 공급량을 서서히 증가 시켜 20kg/hr로 공급하였다(b). 연료량의 증가로 주탑(riser)의 전체적인 온도가 상승하였는데, bed의 온도는 800°C에서 형성되었으며, free board부의 온도는 더욱 상승하여 900°C의 온도 분포를 나타내어 온도 분포가 이원화됨을 알 수 있었다. RDF의 공급량을 고정한 상태에서 공기량을 340Nm³/hr로 증가 시키면, 내부의 온도가 850°C로 균일하게 분포하였다(c). 이는 유동화속도의 증가로 유동매체의 혼합이 활발해지고, 또한 연소공기의 노내 체류시간의 감소로 인하여 free board부에서 연소하던 입자들이 후단의 hot cyclone으로 유출되기 때문으로 사료된다. 공기량을 증가시켜 400Nm³/hr를 공급할 경우, 더욱 노내 온도가 균일화되었으며, 외부공기의 과량 공급으로 전체적인 온도는 800°C 정도로 감소하는 경향을 나타내었다(d). 연소조건이 안정된 상태에서 연료량을 서서히 증가 시켜 30kg/hr를 공급하였는데(e), 설계시 고려했던 연료량이 50kg/hr였음에도 불구하고 과열되어 국부적으로 free board부의 온도가 1,000°C를 넘어서는 현상이 발생하였다. 이는 RDF의 조성이 다소 불균질하여 발열량의 차이가 크기

때문으로 판단되며, 또한 연소로 열회수부의 충분한 열회수 및 외부 열손실에 다소 차이가 있었기 때문으로 생각된다. 추후 실험 시 water jacket등을 사용하여 free board 영역의 국부적인 과열 및 열수지를 조정할 경우, RDF의 공급량을 늘려서 운전하는데는 무리가 없다고 판단된다. 본 pilot 설비로 RDF 투입량을 늘려가며 노내 온도를 1,000℃ 이상으로 장시간 운전하기엔 무리가 있었다. 따라서 24kg/hr의 공급량으로 안정적인 운전을 하면서 공기량을 320, 370, 420Nm³/hr로 증가시켰다. 온도 분포는 공기량이 증가하는 순간에 다소 감소하였다가 10 ~ 20분후 본래의 온도로 빠르게 안정화되는 경향을 나타내었다.



- | | |
|---|---|
| a : RDF 10 kg/h, 300 Nm ³ /h(4.8m/s) | b : RDF 20 kg/h, 300 Nm ³ /h(4.8m/s) |
| c : RDF 20 kg/h, 340 Nm ³ /h(5.5m/s) | d : RDF 20 kg/h, 400 Nm ³ /h(6.4m/s) |
| e : RDF 30 kg/h, 320 Nm ³ /h(5.1m/s) | f : RDF 24 kg/h, 320 Nm ³ /h(5.1m/s) |
| g : RDF 24 kg/h, 370 Nm ³ /h(5.9m/s) | h : RDF 24 kg/h, 420 Nm ³ /h(6.7m/s) |
| i : system off | (m/s) 가스공급속도 |

[그림 3-5] Temperature profile in the CFBc for incinerating RDF.

② 연소가스 분석

본 실험에서는 RDF 공급량 및 과잉공기비의 조절에 따른 배가스 조성 분석을 수행하였다. 시료의 채취는 굴뚝에서 하였으며, 연소로에서 발생하는 배가스를 처리장치를 거치지 않은 상태에서 (여과집진기 bypass) 채취, 분석하였다.

O₂, CO, CO₂, NO_x, SO_x 등의 배기가스는 연소조건별로 3회에서 5회씩 측정하여 평균하였으며, 결과를 표 3- 5에 나타내었다. 또한 운전조건이 안정화된 상태에서 HCl, H₂S, HCN, 페놀, 벤젠, 먼지, Hg, As, Pb, Br₂, HCHO 등을 측정하였으며, 그 결과를 <표 2- 7>에 나타내었다. 적절한 외부순환유동층의 유속을 유지시키면서 연료량은 설계치의 반정도만을 공급하였기 때문에 전체적으로 O₂ 농도가 높았으며, 반대로 CO₂ 농도는 3.7 ~ 6.8%로 낮은 농도를 나타내었다. CO 농도의

경우도 비교적 낮은 농도로 나타났으며, 다만, RDF 공급량을 30kg/hr로 증가시킨 후 바로 측정된 결과 불완전 연소로 인한 CO 농도의 급격한 증가 현상이 발생하였다. NOx의 경우 공기비의 증가에 따라 농도가 높아지는 경향을 나타내었다. 연료량을 20, 24, 30kg/hr로 차츰 증가 시킬 경우, bed와 freeboard의 온도는 상승하였으나, NOx의 농도는 비례해서 증가하지 않았다. 일반적으로 알려진 연소로 NOx의 생성과정은 고온에서 공기 중의 질소성분과 반응하여 발생하는 thermal NOx이지만, 본 실험에서는 연소로 온도가 비교적 낮은 800~1,100℃로 운전하였기 때문에 큰 영향을 받지 않았다고 사료된다. 오히려 이론공기량의 증가로 인하여 과잉공기비가 감소하게 되어서 NOx의 농도가 전반적으로 낮아지는 경향을 나타내었다.

연료량이 일정한 상태에서 연소공기량을 증가시킬 경우, 연료 내의 질소성분과 연소공기 내의 산소의 반응이 커져서 NOx의 농도가 높아지는 것을 알 수 있었다. SO2는 매우 낮은 농도로 측정되어, RDF의 유동층 연소시 거의 발생하지 않는 것으로 조사되었다.

<표 3- 5> Concentrations of emissions in the flue gas for RDF combustion.

Feeding rate (kg/hr)	Air flow rate (CMH)	Bed temp. (°C)	F.B.* temp. (°C)	Gas temp. (°C)	Gas conc.**				
					O2 (%)	CO2 (%)	CO (ppm)	NOx (ppm)	SO2 (ppm)
20	300	789	914	170	16.6	3.8	1.5	210.6	ND†
	350	806	868	199	15.8	4.5	1.0	199.8	ND
	400	763	860	196	16.7	3.7	9.5	249.5	0.5
24	320	869	976	221	15.0	5.2	3.2	180.0	1.0
	370	818	1023	207	15.1	5.1	14.2	195.0	0.4
	420	838	943	210	17.5	3.0	0.6	274.8	ND
30	320	900	1038	203	13.3	6.8	764.0	98.0	ND
	380	923	1071	216	13.4	6.7	53.9	131.1	ND
	450	985	1129	223	14.4	5.7	9.0	152.5	ND

* : freeboard, ** : O2 12 % 기준, † : not detected

안정적인 연소조건을 유지하면서, 먼지를 포함한 대표적인 가스상오염물질의 농도를 측정하였다. 배출허용기준을 초과한 항목은 먼지가 유일하였으며, 143.6, 118.0mg/Sm3으로 측정되었다. RDF 연소시 가장 우려되었던 HCl의 경우 평균 36.44 ppm으로 나타나 기준치인 50ppm에는 미치지 않는 것으로 조사되었다. 그러나 RDF는 플라스틱이 불균일하게 포함되어있기 때문에 산성가스에 대한 조사는 지속되어야 한다고 사료된다.

<표 3- 6> Concentrations of emissions in the flue gas for RDF combustion.

항목	배출허용기준	단위	1차	2차	평균
먼지	100(12)*	mg/Sm ³	143.60	118.00	130.80
HCl	50(12)	ppm	39.21	33.66	36.44
SOx	300(12)	ppm	5.94	6.97	6.46
NOx	200(12)	ppm	113.80	132.60	123.20
CO	600(12)	ppm	55.30	33.80	44.55

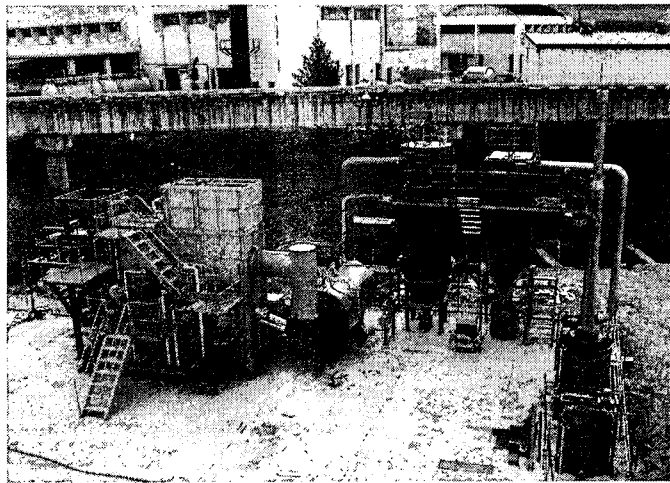
* : 산소농도 기준 (%), **: Not detected.

3-2-3 구동화격자식 연소로에서 연소실험

가. 연소설비 구성 및 실험방법

본 연소설비는 처리용량 100kg/hr인 구동화격자방식의 연소로이다. 설비의 구성은 폐기물 투입설비, 연소로 본체, 폐열보일러, 연소잔재 배출장치, 대기오염방지설비, 제어반 등으로 구성되어 있으며 그림3-6은 본 설비의 전체 전경을 보여주고 있다.

100kg/hr 화격자식 연소로에서 성형 RDF와 Fluff RDF을 연소하여 그 연소특성을 살펴보았다. 실험에 사용한 RDF의 물성치는 표 3-7과 같다. 그림 3-7과 같이 성형하지 않은 Fluff RDF와 이 Fluff RDF를 그림 3-8과 같이 pellet으로 성형한 RDF가 이 실험에서 사용되었다. 성형 RDF의 경우 수분함량이 19.2%로서, 성형과정 또는 운반과정에서 수분이 다소 많이 포함되었다. Fluff RDF보다 발열량이 약간 낮게 측정된 것은 이러한 이유 때문이다.



[그림 3-6] 구동화격자식 연소시스템 전경.

<표 3-7> Properties of the RDF.

RDF 종류		성형 RDF(15mm)	Fluff RDF
삼 성 분	수 분 (%)	19.2	6.1
	가연분 (%)	57.5	68.5
	회 분 (%)	23.3	25.4
저위발열량(Kcal/kg)		4,212	4,836



[그림 3-7] Fluff RDF.



[그림 3-8] Pellet RDF(15mm.)

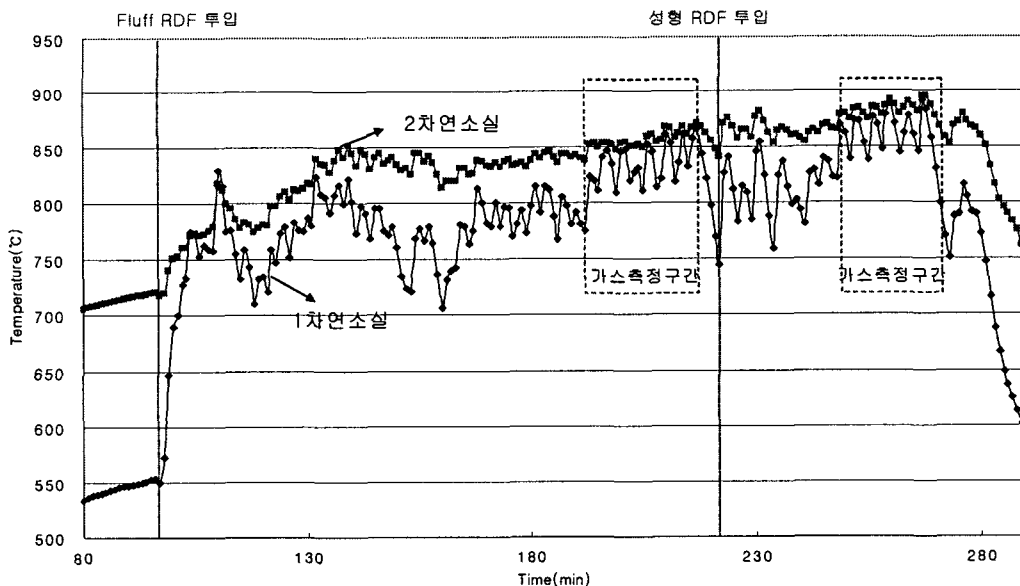
실험방법은 먼저 1차 및 2차연소실 버너를 이용하여 노내의 온도를 시료가 충분히 연소될 수 도록 가열한 다음 1차버너의 가동을 중지시킨다. RDF를 5kg씩 무게를 잰 다음 일정한 시간 간격 (약 4분)을 두고 정량 투입한다. 2차 연소실 온도가 약 850℃ 이상이 되고 연소실 온도가 일정하게 유지되었다고 판단되었을 때 배가스 분석기를 이용하여 배가스 농도를 측정하였다. 또한 실시 시간으로 1차 및 2차 연소실 온도데이터를 저장하였다.

나. 실험결과 및 고찰

① 온도분포

그림 3-9는 성형 RDF와 Fluff RDF를 연소시켰을 때 노내 온도분포를 각각 나타낸 것이다. Fluff RDF를 먼저 투입하였으며 그 다음 성형 RDF를 투입하였다. 보는 바와 같이 사각형 부분이 정상상태라고 판단하여 그 시간에 배가스를 각각 측정하였다.

Fluff RDF와 성형 RDF를 연소하였을 때 온도분포를 비교해 보면 1차 및 2차연소실의 온도분포 패턴이 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 특히 1차 연소실은 폐기물의 투입시간과 맞물려 일정한 패턴을 가지며 온도가 상승 혹은 하강하는 것을 볼 수 있다. 온도분포 패턴은 거의 비슷할지라도 1차 및 2차 연소실의 온도는 성형 RDF의 경우가 더 높다는 것을 알 수 있다. 특히, 성형 RDF의 경우 저위발열량이 Fluff RDF보다 낮음에도 불구하고 온도는 더 높다는 것은 앞 절에서의 1kg/hr 실험에서도 알 수 있듯이 높은 밀도를 가진 성형 RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리하다는 것을 알 수 있다.



[그림 3-9] RDF 연소시 노내 온도분포.

② 연소가스 분석

표 3-8은 정상상태에서 Fluff RDF와 성형 RDF의 배가스 농도를 나타낸 것이다. 폐기물이 투입된 직후 산소농도가 점차 감소하였고 그 때 CO의 농도가 증가하였다. 온도분포와 마찬가지로 폐기물 투입과 함께 O₂와 CO의 농도도 하나의 사이클을 이루고 있었다. 이전의 1kg/hr 실험과는 다르게 Fluff RDF와 성형 RDF의 배가스 특성은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이것은 처리 규모가 커지면서 실험실 규모의 실험에서 나타나는 현상들이 상쇄되었기 때문으로 판단된다. HCl 농도는 각각 평균 12ppm, 21ppm으로 소석회 등의 제거시설 없이 낮은 값을 나타내었다. 대체적으로 Fluff RDF와 성형 RDF 모두 원활한 연소가 이루어졌다.

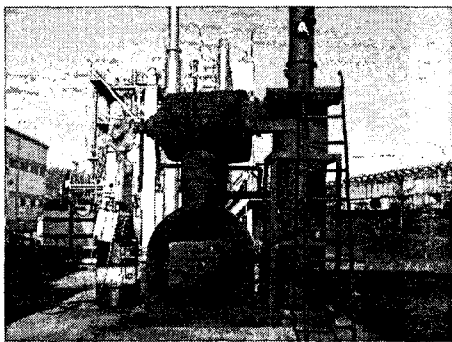
<표3- 8> RDF 종류에 따른 배가스 농도

RDF종류 \ 배가스농도	O ₂ (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	SO ₂ (ppm)	HCl (ppm)
Fluff RDF (평균값)	7.1~14.7 (10.2)	0~213 (55)	70~99 (79)	12~36 (23)	10~17 (12)
성형 RDF (평균값)	7.9~13.6 (10.3)	0~143 (42)	-	-	17~28 (21)

3-2-5 회분식 연소로에서 연소실험

가. 연소설비 구성 및 실험방법

본 연소설비는 50kg/hr의 설계용량을 가진 회분식 연소로로서 그림 3-10과 같다. 주요 장치구성은 1차 및 2차 연소실, F/D 팬, 2차연소실 승온버너, 제어반 등으로 구성되어 있다.



[그림 3-10] 회분식 연소로 전경



[그림 3-11] 1차연소실 내부

나. 시료 및 실험방법

50kg/hr 회분식 연소로에서 성형 RDF와 Fluff RDF을 연소하여 그 연소특성을 살펴보았다. 실험에 사용한 RDF의 물성치는 표 3-9와 같다. 그림 3-12와 같이 성형하지 않은 Fluff RDF를 1kg씩 무게를 달아 그림 3-13과 같이 검은 봉지에 담아 투입이 쉽도록 하였다. 그림 3-14와 같은 성형 RDF도 1kg씩 무게를 달아 투입하였다.

<표2- 18> Properties of RDF

RDF 종류		성형 RDF(15mm)	미성형 RDF
삼성분	수 분 (%)	6.3	5.4
	가연분 (%)	66.7	69.0
	회 분 (%)	27.0	25.6
저위발열량 (Kcal/kg)		4,046	3,220

실험방법은 먼저 경유버너를 이용하여 2차연소실 온도를 시료가 충분히 연소될 수 있도록 가열한 다음 RDF를 1kg씩 무게를 달아 일정한 시간 간격(약 1분)을 두고 정량 투입하였다. 2차 연소실 온도가 약 850℃ 이상이 되고 연소실 온도가 일정하게 유지되었다고 판단되었을 때 배가스 분석기를 이용하여 배가스 농도를 측정하였다. 또한 실시간으로 2차 연소실 온도데이터를 저장하였다.

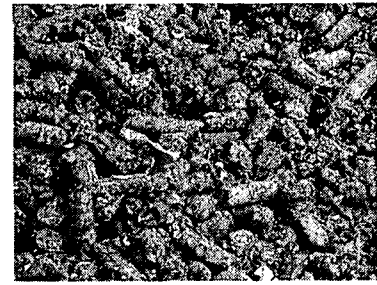
실험과정은 다음과 같다. 정상상태에서 시료 1kg을 투입한 다음 1분이 지난 후 배가스 농도를 측정하고 바로 시료 1kg을 투입한 후 인력에 의한 교반을 실시하였다. 다시 1분이 지나면 시료 1kg을 투입하고 1분 뒤 바로 배가스 농도를 측정하는 이러한 과정을 반복하였다.



[그림 3-12] 미성형 RDF



[그림 3-13] 미성형 RDF를 1kg씩 봉지에 담은 모습



[그림 3-14] 성형 RDF

나. 실험결과 및 고찰

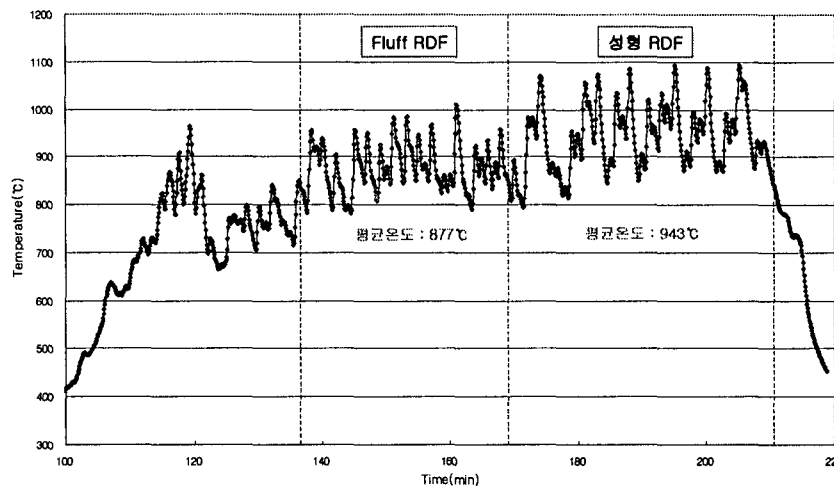
① 온도분포

그림 3-15는 성형 RDF와 Fluff RDF를 연소시켰을 때 2차연소실 온도분포를 나타낸 것이다. Fluff RDF를 먼저 투입하였으며 그 다음 성형 RDF를 투입하였다. Fluff RDF의 경우 투입량은 60kg/hr였으며 성형 RDF는 51kg/hr였다.

보는 바와 같이 최저온도와 최고온도의 편차가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 시료를 투입하기 직전에 최저의 온도를 보였으며 시료 투입 후 서서히 상승하였으며 교반이 이루어진 이후에는 더욱 온도가 상승하였다. 이러한 온도편차는 회분식 연소로에서 잘 나타나는 특징이며 또한 온도유지에 교반의 효과가 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Fluff RDF와 성형 RDF 연소시 온도분포를 비교했을 때 성형 RDF의 경우 평균온도가 943℃로 Fluff RDF의 877℃보다 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. 성형 RDF의 경우 저위발열량이 4,046kcal/kg으로 Fluff RDF의 3,220kcal/kg보다 다소 높지만 투입량이 각각 51kg/hr으로 Fluff RDF의 60kg/hr보다 적다. 즉 시료의 총 투입된 열량은 거의 비슷하지만 성형 RDF의 평균온도는 훨씬 높다는 것이

다. 이러한 특성은 앞의 실험에서와 같은 결과로서 높은 밀도를 가진 성형 RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리하다는 것을 알 수 있다.



[그림 3-15] 2차연소실 온도분포도

② 연소가스 분석

표 3- 10은 정상상태에서 Fluff RDF와 성형 RDF의 배가스 농도를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 폐기물이 투입 직전에 측정된 값이며 교반이 이루어질 때는 CO농도가 매우 높기 때문에 측정에서 제외하였다. 보는 바와 같이 산소농도 및 NO 농도는 Fluff RDF와 성형 RDF 모두 비슷하였으며 CO 및 SO2는 Fluff RDF보다 성형 RDF가 다소 높게 나타났다. 그러나 대체적으로 Fluff RDF와 성형 RDF 모두 원활한 연소가 이루어졌다.

<표 3- 10> RDF 종류에 따른 배가스 농도

RDF 종류 \ 배가스 농도	O2 (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	SO2 (ppm)
Fluff RDF (평균값)	8.2~11.4 (10.3)	1~51 (14)	55~101 (83)	0 (0)
성형 RDF (평균값)	8.1~12.0 (10.0)	3~158 (60)	67~130 (87)	1~61 (23)

4. 결 론

본 연구에서는 비교적 규모가 큰 다양한 연소장치를 이용하여 실험을 하였으며 각각의 연소장치에서 RDF를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며 본 실험은 시작단계에 불과하며 앞으로 계속적으로 연소실험을 통하여 충분한 결과들을 얻을수 있도록 연구를 수행할 계획이다.

- 기포유동층 연소로에서는 투입량을 5kg/hr으로 하였을 때 가스공탑속도 1.2m/s, 2차연소용공기 300 - 400l/min. 으로 운전할 때 연소온도가 900℃ 부근에서 안정적인 연소가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

- 순환유동층 연소로의 경우 당초 설계시 고려하였던 투입용량이 50kg/hr 였으나 정량을 투입할 경우 free board부 온도가 1,000℃ 이상으로 과열되는 현상이 발생하여 정량투입을 할 수 없었으며 실험 결과 24kg/hr을 투입하면서 가스공탐속도 5.1m/s - 6.7m/s 범위에서 온도분포가 안정되는 것을 알 수 있었다.

- 순환유동층 연소로에서 연료량이 일정한 상태에서 연소공기량을 증가시킬 경우, 연료 중의 질소성분과 연소공기 중의 산소와의 반응이 커져서 NO_x의 농도가 높아지는 것을 알 수 있었으며 SO₂는 매우 낮은 농도로 측정되어, RDF의 유동층 연소시 거의 발생하지 않는 것으로 판단되었으며 가장 우려되는 HCl의 경우 평균 36.4ppm으로 배출허용기준치보다는 낮으나 저감대책이 필요한 것으로 판단되었다.

- 연속연소식 연소로의 경우 성형RDF와 fluff RDF를 비교 실험한 결과 1, 2차연소실의 온도가 성형RDF 쪽이 더 높다는 것을 알 수 있었으며 이처럼 높은 밀도를 가진 성형RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리한 것을 알 수 있었으며 배가스 특성은 비슷한 값을 나타내었다.

- 회분식 연소로에서의 성형RDF와 fluff RDF 비교 실험 결과 총 투입된 열량은 거의 비슷하지만 성형RDF의 평균온도가 훨씬 높게 나타나 앞의 실험 결과와 같이 높은 밀도를 가진 성형RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리한 것을 알 수 있었으며 배가스 특성은 비슷한 값을 나타내었다.

사 사

본 연구는 2004년 산업자원부에서 시행한 에너지·자원기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. 노남선 외 : “폐기물 고품연료(RDF)의 고효율 연소보일러 개발”, 한국에너지기술연구원, 최종보고서, 170 pp. (2002).
2. 노남선 외 : “RDF 연소설비의 표준화/규격화 방안 구축 연구”, 한국에너지기술연구원, 중간보고서, 53 pp. (2003).
3. 노남선 외 : “무한주행식 화격자형 소형보일러에서의 RDF 연소재 발생특성에 관한 연구”, 한국폐기물학회지, 제20권, 제4호. pp. 393 ~ 403 (2003).
4. 윤근덕 외 : “환경성을 고려한 RDF 품질표준화 연구”, 산업기술시험원, 최종보고서, 457 pp. (2003).
5. 김우현 외 : “폐기물 고품연료(RDF)의 유동층 연소기술 개발”, 한국기계연구원 최종보고서

(2002).

6. 최연석 외 : “도시 폐기물의 고품 연료화 장치 개발”, 한국기계연구원 중간보고서 (1999).
7. 소현조 : “국내산 RDF(Refuse-Derived Fuel)의 물성 및 연소특성 연구”, 한밭대학교 석사논문, 80 pp. (2001).
8. 최연석, 권영배 : 폐기물 고품연료(RDF)의 특성 및 전망”, 한국폐기물학회지, 제15권, 제4호, pp. 287 ~ 299 (1998).
9. 최경빈 외 : “폐기물의 에너지화 기술개발 연구(II) - 중소도시용 중소형 청정 소각장치 개발 (II)”, 한국에너지기술연구소 연구보고서, pp. 155 ~ (1998).
10. 김영재 외 : “폐합성수지계 RDF의 연속식가스화 연소장치 개발”, 한국에너지기술연구소 중간보고서 (1999).
11. 이민기, 유종익, 서용철 : “PVC(Polyvinyl Chloride)의 저온열분해를 통한 HCl 회수 방법 및 최적 온도 추정” 한국폐기물학회지, 제18권, 제1호, pp. 113~120 (2001).
12. 전홍석 외 : “대체에너지 기술개발 기본계획 개선연구 - 폐기물에너지”, 한국에너지기술연구소 연구보고서(951Z101103FG1), pp. 337 ~ 348 (1996).
13. 박영성 외 : “특정폐기물의 에너지화 기술 연구 - 폐기물의 유동층 소각 기술”, 한국에너지기술연구소 연구보고서(KE-93012B), pp. 76 ~ 88 (1993).
14. 김승도 외 : “소형 소각시설의 문제점 및 개선방안에 대한 연구”, 한국폐기물학회지, 제14권, 제8호, pp. 921 ~ 932 (1997).
15. 김영도 : “도시 쓰레기 소각료”, 대한기계학회지, 제34권, 제8호, pp. 617 ~ 625 (1994).
16. 김우현 외 : “특집-소형 소각료”, 월간폐기물 5월호, pp. 70 ~ 113 (1997).
17. 환경부 : “폐플라스틱 고품연료 제품의 품질기준·사용처 등에 관한 기준”, 환경부 고시 제 2003-127호 (2003).
18. Nissen, W. R. : “Combustion and Incineration Processes”, Marcel Dekker, Inc., New York, 371 pp. (1978).
19. Ege, H. D. and Joensen A. : “RDF Co-Firing with Coal in Utility Boilers”, Combustion Modeling, Cofiring and NOx/Control : Proceedings of the 1993 International Joint Power Generation Conference, Kansas City, USA, The American Society of Mechanical Engineers, pp. 217 ~ 224 (1993).
20. Stanislav, V. V. and Colette, B. D. : “Characterization of Refuse-Derived Char from Municipal Solid Waste - 2. Occurrence, Abundance and Source of Trace Elements.”, Fuel Processing Technology, Vol. 59, pp. 135 ~ 161 (1999).
21. Kamiya H. et al. : “Fundamental Analysis of Chlorine Distribution Behaviors during Refused Derived Fuel(RDF) Combustion in Fluidized Bed”, 日本 化學工學論文集, 第26卷 第3号, pp. 462 ~ 466 (2000).