

1 MWe급 순환유동층 열병합 보일러 운전연구

선도원[†] · 배달희 · 조성호 · 이승용

한국에너지기술연구원 온실가스센터
305-343, 대전광역시 유성구 가정로 102
(2012년 2월 4일 접수, 2012년 7월 9일 채택)

Combustion Study of 1 MWe Circulating Fluidized Boiler for RDF

Dowon Shun[†], Dal Hea Bae, Sung Ho Jo and Seung Yong Lee

Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research, 102 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 4 February 2012; accepted 9 July 2012)

요 약

폐기물 고형연료의 순환유동층 연소기술의 시범을 위하여 파일롯트 규모 순환유동층 연소보일러를 설계하고 건설하였다. 보일러의 규모는 출력기준 약 6 MWth에 해당하며 증기질은 400 °C, 38 ata로 설계하였다. 최대 증기출력은 약 8 ton/h에 해당한다. 연료는 RDF로 휘발분을 주성분으로 하며 점화가 빠르고 연소성이 매우 뛰어나며 보일러의 연소효율은 99.5%를 능가하였다. 순환유동층 RDF 연소의 안정성은 연료중 회분 이외의 이물질의 존재 여부와 신속한 배출 가능성에 크게 의존하였다. 오염물질의 배출농도는 염소를 제외하고는 법적 기준치 이내에 들었다. 또한 60% 정도의 연료중 염소는 비산재에 흡수되는 것으로 나타났다. HCl을 국내 법 규제에 맞추어 제어하기 위해서는 건식 또는 습식 흡수 장치와 같은 별도의 환경설비가 필요하였다.

Abstract – A pilot scale circulating fluidized boiler (CFB) for refuse derived fuel (RDF) is designed and constructed to demonstrate a performance of CFB technology for waste fuel utilization. The boiler has a design capacity of 6 MWth with 400 °C 38 ata steam generation performance. The maximum steam rate of the boiler was about 8 ton/h. The main component of the fuel was RDF (Refuse Derived Fuel) with high volatile contents and showed fast ignition and easy combustion. The pilot plant showed over 99.5% of combustion efficiency. Stable operation of RDF CFBC depended on the content of non combustion materials other than ash and fast removal of them. Emission level was under legal limit except that of HCl without external flue gas treatment facilities. Also about 60% of fuel chlorine was absorbed to fly ash particles. For HCl emission control flue gas treatment technology is required such as wet and dry scrubber in order to comply with Korean regulation.

Key words: Circulating Fluidized Boiler (CFB), Refuse Derived Fuel (RDF), Combustion

1. 서 론

폐기물 고형연료에 관한 제반 규정이 2006년 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률에 폐기물 고형연료에 관한 조항을 도입하고 [1], 2007년 대기환경 보전법 시행규칙 개정에 폐기물 고형연료 연소에 따른 배출허용 기준을 추가함으로써 [2] 정비되었다.

순환유동층 연소기술 [3]은 고형폐기물 연료의 연소에 적합한 기술로 여러 나라에서 이미 상용화되었다. 국내에서는 폐기물 연료 시장이 늦게 열림에 따라 그동안 보일러 수요가 없어 개발이 늦었으나 최근의 석탄 가격 앙등 이후 폐기물 연료 시장이 점차 관

심을 갖게 되면서 순환유동층 보일러 역시 주목을 받게되었다. 그러나 아직 상용 순환유동층 보일러의 국산 실적은 없으며 해외 도입기술은 지나치게 비싸 경제성이 맞지 않은 형편이다.

본 연구의 목적은 RDF를 연료로 사용하여 증기와 전기를 생산할 수 있는 순환유동층 보일러를 국산화 개발하여 상용화 보급하는데 있다. 이를 위하여 1 MWe급 순환유동층 보일러를 자력으로 설계하고 국내 기술로 제작 건설하였다. 또한 순환유동층 보일러를 이용하는 산업체에 운전 및 관리기술을 전수하고자 시운전을 통하여 운전기술을 축적하였다.

본 고는 RDF 연소 순환유동층 열병합 발전시스템 개발을 위하여 설계하고 제작한 순환유동층 보일러의 기술사항과 운전특성을 요약한 것이다. 보일러의 용량은 출력기준 6 MWth 이며 발전용량으로 1 MWe에 상응하는 규모이다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dshun@kier.re.kr

*이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

2. 1MWe급 순환유동층 보일러 개발

2-1. 설계 및 건설

RDF 연소를 위한 순환유동층 실증 규모 보일러의 설계, 제작 및 건설을 수행하였다. 설비는 연료의 저장 및 공급장치, 순환유동층 연소로 및 대류전열부, 반건식 반응기, 백필터 및 세정장치와 연돌로 구성하였다. 증기량 8 ton/h 규모로 발전을 위하여 450 °C, 38 ata의 증기를 생산할 수 있게 제작 하였다. Table 1에는 설비의 규격을 나타내었다[4,5].

Fig. 1과 같이 순환유동층 보일러의 증기 흐름은 절탄기→드럼→증발기→드럼→과열기1→과열기2 순으로 구성하였다. 과열기의 보호를 위하여 모든 과열기는 사이클론 후단부인 대류전열부에 설치하였다. 배열 조절장치는 반건식 흡수탑, 백필터, 세정탑과 연돌 순으로 구성하였다. 증발기는 연소로 내부 벽면에 설치하였다.

Fig. 2에는 설계에 적용된 보일러의 물질수지 연소실험을 통하여 보완하여 보일러 성능으로 제시하였다. RDF 연료의 공급량은 시간당 1.24 ton으로 시간당 8.2 ton의 증기를 생산하도록 하였다. Fig. 3는 설계 보일러의 열수지를 나타내었다. 생산된 스팀은 총열량은 6,550,000 kcal/h이며 공급수의 열량은 900,000 kcal/h이다. K-RDF를 기준으로한 열효율은 고위발열량 대비 79%로 나타난다. 보일러 효율은 Fig. 1과 Fig. 2로부터 다음과 같이 계산하였다.

Table 1. Specification of CFBC

Specification	Basis
Fuel consumption, ton/h	1
Steam production rate, ton/h	8
Thermal output, MWth	6
Steam temperature, °C	450
Maximum steam pressure, ata	38
Main fuel	RDF/RPF
High heating value of design basis, kcal/kg	5669
Expected boiler efficiency, %	80

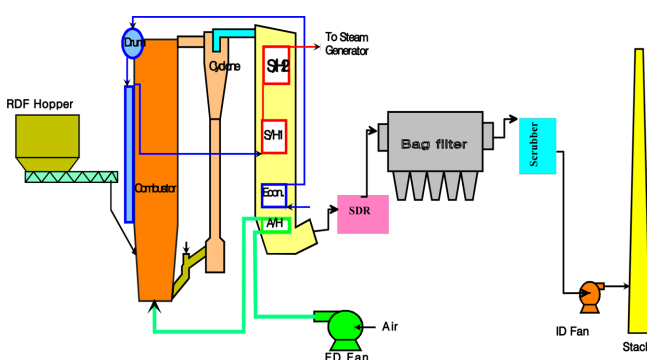


Fig. 1. Process diagram of the CFBC boiler system for RDF.

Table 2. Analysis of waste derived fuels

Sample	Moisture (%)	Volatiles (%)	Ash (%)	Fixed carbon (%)	S (%)	C (%)	H (%)	N (%)	HCl (%)	High heating value (kcal/kg)
Dried sludge	5.8	51.8	42.3	0.0	2.2	30.7	5.2	4.8	N.A.*	2,773
Agricultural sheet	0.6	97.2	0.14	2.1	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	0.2	10,550
D-RPF	1	85.1	7.3	6.5	0.2	56.0	7	0.2	0.8	7,480
K-RDF	6.7	69.26	16.2	7.9	0.2	52.6	7.9	0.6	1.0	5,710

N.A.*: not analyzed

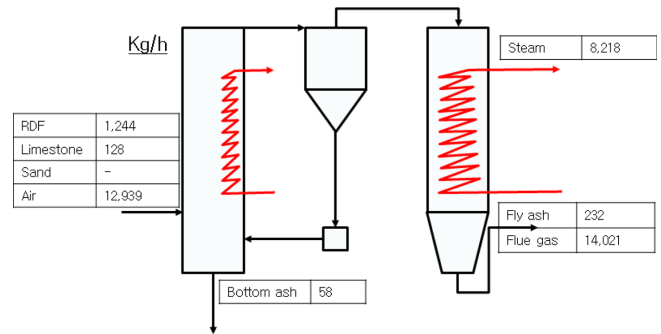


Fig. 2. Mass balance of the CFBC boiler design.

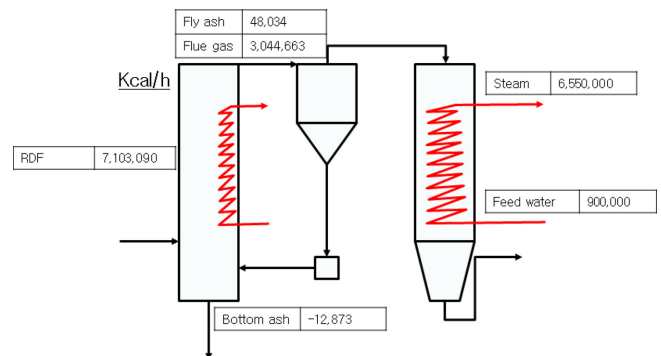


Fig. 3. Heat balance of the CFBC boiler design.

$$E = \frac{(6,500,000 - 900,000) \text{ [kcal/h]}}{(5710 \times 1,244) \text{ [kcal/h]}}$$

3. 운 전

3-1. 연료특성

사용된 연료[5]는 D사의 D-RPF와 K사의 K-RDF이다. RDF는 원주시 생활계 폐기물을 원주시 생활폐기물 연료화시설에서 성형한 것이다. RPF의 원료는 플라스틱 포장재를 주로 Add-on 믹서 방식으로 제조한 것이다. Table 2에는 시험에 사용한 RDF와 RPF의 성분분석을 건조 슬러지와 수집한 농촌 폐비닐과 비교하여 나타내었다. 각 시료에 대해 공업분석과 원소분석을 하였으며, 염소농도를 Eschka 시약에 의한 전위차 측정법으로 분석하였다.

Table 2에 시료의 분석결과를 나타내었다. 필름형태 플라스틱을 주 원료로 만들어진 D-RPF는 회발분과 고정탄소인 가연성분이 93.4% 불연성분 성분은 6.6%에 달했다. K-RDF는 생활계 폐기물을 원료로 만들어 졌으나 가연분은 주로 바이오메스나 플라스틱 계열이며 가연성분이 74% 불연성분이 20% 정도를 나타내었다. RDF나 RPF는 석탄과 같은 다른 고형연료에 비하여 회발분이 많다. K-RDF는 성형과정에서 무게비 2.5%의 소석회가 첨가되어 있다.

Table 3. Comparison of apparent density of D-RDF and K-RPF

Sample	Apparent density	Average
D-RPF	0.38~0.44	0.41
K-RDF	0.45~0.55	0.50
Fly ash	0.96~0.99	0.98

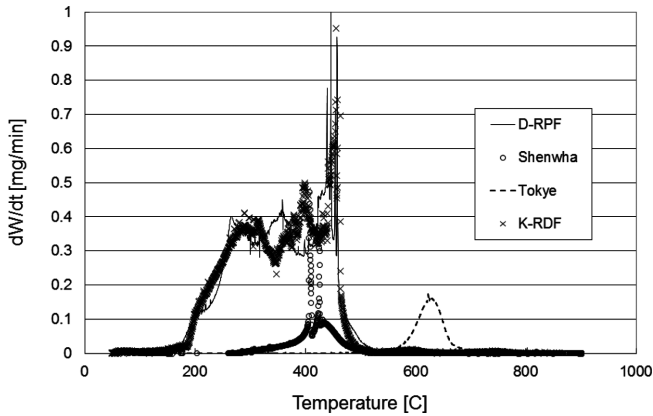


Fig. 4. Comparison of the thermogram of K-RDF and D-RPF.

Table 3에 RPF 및 RDF 시료의 겉보기 비중을 나타내었다. 공극이 크고 과립형태의 RPF의 겉보기 비중은 시료채취 상태에 따라 편차가 있었으나 평균 0.4로 측정되었다.

Fig. 4에 RDF와 RPF의 열중량 분석을 석탄과 비교하여 나타내었다. RPF는 TGA 상에서의 연소 특성이 석탄과는 매우 다른 양상을 나타내었다. 약 200 °C 에서부터 유기성분의 휘발이 나타나기 시작하여 600 °C까지 연소현상이 나타난다. 2개 이상의 반응 극대점이 나타나며 300 °C와 400 °C 부근에서 현저한 극대점이 보인다. 연료가 고정탄소가 적고 휘발분이 주 성분임을 감안하여 볼 때 저온의 극대점은 가벼운 성분의 휘발 그리고 고온의 극대점은 플라스틱의 연소로 나타난다. 연소 시작점은 비교대상인 Shenwha 탄의 연소점과는 같은 구간이나 국내 무연탄 보다는 현저히 낮다.

3-2. 연소로의 예열 및 점화

Fig. 5에 점화와 소화과정을 나타내었다. 기동 초기 연소로의 예열은 경우 덕트 버너를 사용하였다. 덕트 버너란 연소로 분산관을 통해 공급되는 1차공기를 별도의 연료로 가열하여 연소로 내부로

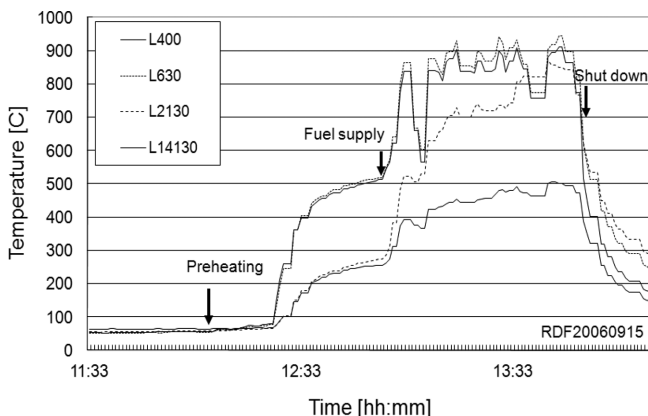


Fig. 5. Combustor temperature variation during start up and shut down.

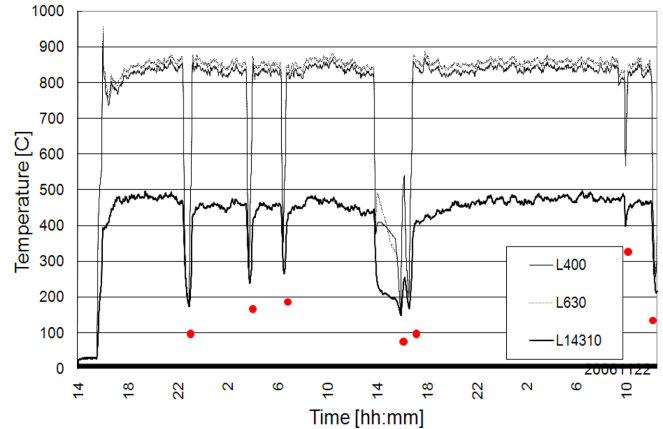


Fig. 6. Temperature profile of combustor during the D-RPF combustion.

열풍을 불어넣어 연소로를 예열하는 방식으로 기존의 연소로 내에 버너를 장착하여 화염으로 직접 가열하는 start up 버너 방식보다 콘트롤이 간단하고 국부 과열 위험이 없이 안전하다. 장치의 규모가 작고 덕트 버너의 용량이 커서 열풍을 불어 넣은 후 1시간 만에 연소로 하부의 온도는 RDF의 자연 발화가 일어날 수 있는 500 °C 부근까지 가열되었다. 소화 시에는 연료를 차단한 상태에서 연소로의 온도가 금속체품의 열화가 일어나지 않은 온도인 300 °C 까지 낮추어 질 때 까지 1차공기를 공급하면서 연소로를 냉각하였다. 소화과정 동안 급수와 F.D.(강제송풍) 및 I.D.(유인송풍) 팬은 정격 운전 조건의 50% 이하의 출력에서 유지하면서 보일러를 서서히 정지 하였다.

3-3. 연소로 운전

Fig. 6은 정상운전 동안 D-RPF를 1000 kg/hr로 공급하면서 연소로의 온도 변화과정을 관찰한 것이다. D-RPF는 연료의 특성상 부분 성형으로 만들어져 연료중 이물질이 혼재하였고 이 이물질로 인하여 조업이 자주 중단되었다. 그림에서 막힌 동그라미 기호는 Feed가 막혀 연료공급이 중단되거나, 불규칙한 연료의 모양으로 인하여 연료 Hopper 내에서 원활하게 흐름이 이루어지지 않고 정체하면서 연료투입이 중단되어 연소로의 온도가 급격히 떨어지는 것으로 운전중단을 의미한다. 운전중단이 발생하면 연료공급 이외의 라인을 유지하면서 연료 공급라인을 정비한 후 다시 가동하였다. 그 밖에 정상운전의 장애 요인은 대체로 다음과 같이 나타났다.

- F.D. fan이나 I.D. fan의 과부하에 의한 인버터 정지
- 연료 중 이물질이나 부정형 물질에 의한 연료 공급라인의 막힘
- 저장조 내에서 경사각이 낮거나 흐름이 이루어지지 않고 정체
- 연소로, 사이클론, loop seal과의 연결부의 기밀 유지 불량으로 공기가 새는 현상
- 비중이 낮은 입자가 착화 후 연소가 완결되기 전에 연소로를 빠져나가 착화된 채로 백필터에 닿아서 백필터에 화재를 일으키는 현상

Fig. 7은 K-RDF를 연료로 사용하여 운전한 온도 그래프이다. 버너 초기 가동 시 점화 이상이 발생하였으나 버너를 재 점검한 후 실시하여 정상적으로 점화를 하고 bed 온도 500 °C 이상까지 버너로 승온한 후 연료를 투입하였다. 승온 후의 연소로 온도는 Fig. 5와 같

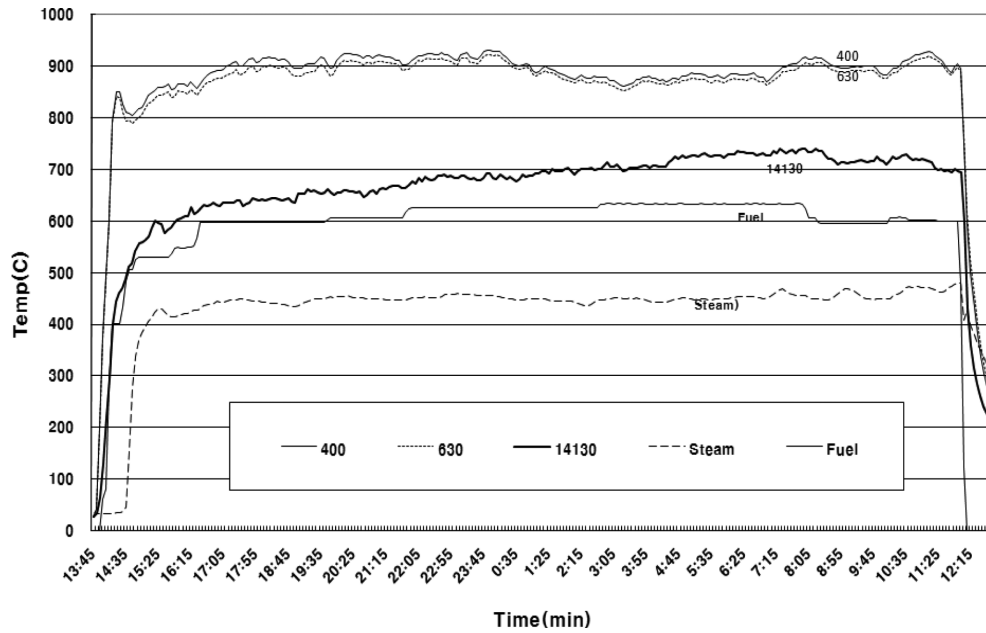


Fig. 7. Temperature profile of combustor during the K-RDF combustion.

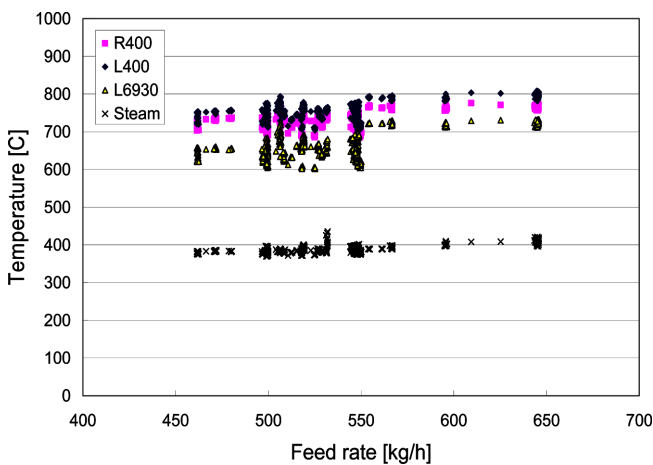


Fig. 8. Temperature profile of combustor and steam by feed rate.

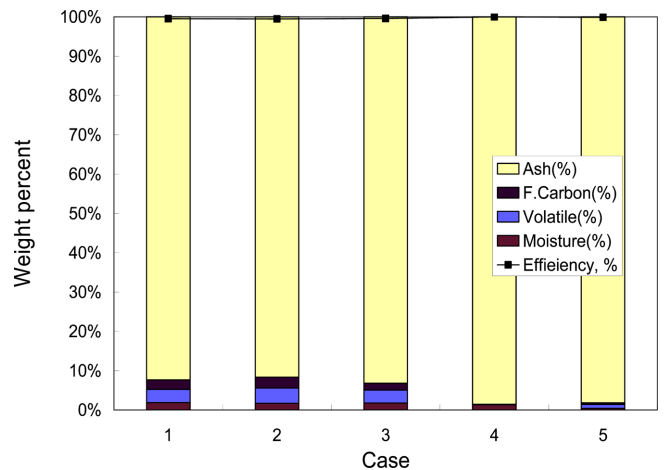


Fig. 9. Proximate analysis of fly ash from D-RPF combustion.

이 연료량에 따라 온도변화를 나타내었으며, 450 °C 전후의 일정한 온도의 steam을 생산할 수 있었다. 성형된 RDF는 연료의 공급이 매우 원활하여 연료 공급 장애 요인이 전혀 없었으며 이물질이 없어 유동화 상태도 일정하게 유지되었고 따라서 연소상태도 매우 안정적이었다. Fig. 8에 연소로 온도변화와 이에 따른 스팀 온도 변화를 나타내었다. 운전 중 연소로 프리보드의 온도변화가 연료 공급량에 대응하여 나타났으나 반면 연소로 하부나 스팀온도는 연소로 온도에 비해 변화가 작게 나타났다. 프리보드의 온도(L6930=분산판 위 6930 mm 지점)가 620~720 °C까지 변하는 동안 출구 스팀의 온도는 425~445 °C까지 작은 범위에서 변화였다.

연소 후에는 연소재의 공업 분석을 수행하였고 이를 토대로 연소 효율을 다시 계산하였다.

연소효율은 다음과 같이 계산되었다.

$$CE = \left[1 - \frac{\text{Ash}(C, V)}{\text{Feed}(C, V)} \right] \times 100$$

여기서, CE; combustion efficiency %

Ash(C,V); 연소재 중 가연분 즉 카본과 휘발분의 총량

Feed(C,V); 연료중 가연분 즉 카본과 휘발분의 총량

Fig. 9에 D-RPF 연소에 따른 비산재의 공업분석과 연소효율을 나타내었다. 연소효율은 99.5% 이상을 나타내었다. Fig. 10에 K-RDF 연소에 따른 비산재의 공업분석과 이에 따른 연소효율을 계산하여 나타내었다. 연소효율은 역시 99.5% 이상으로 RDF와 RPF 간의 연소효율의 차이는 없이 모두 높게 나타났다. 이는 RDF와 RPF의 주 성분이 연소성이 뛰어난 가연분이며 고정탄소 역시 석탄이나 석유 코크스와 같은 난연성이 아닌 쉽게 연소되는 성분이며 이로 인해 연소시간 및 연소온도가 낮게 나타나 결과적으로 연소효율이 높게 나타나는 것으로 이해되었다.

Table 4에 RDF 연소후 비산재와 연소로 내 퇴적물의 분석값을 나타내었다. 연돌 하부에는 건조한 미세분진과 배연중 증기가 미세 분진과 함께 응축되어 나타나는 stack floating matter가 혼재하였다.

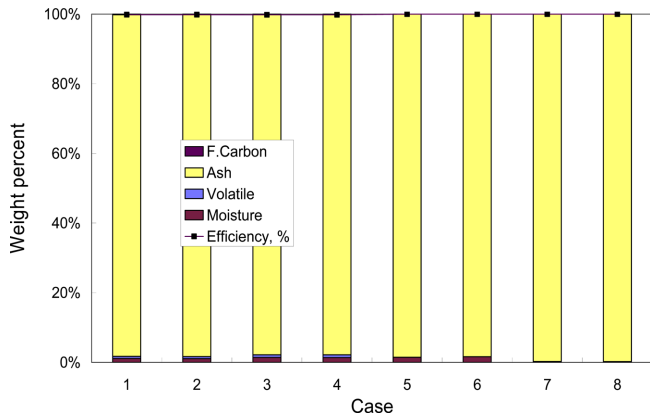


Fig. 10. Proximate analysis of fly ash from D-RPF combustion.

염소는 원료보다 비산재에서 더 농축되어 나타났으며 연소재보다 연소로 내 침전물이나 연돌에 남아있는 미세분진에 더 많이 농축되어 나타났다. 따라서 장기간 운전을 할 경우 백필터 이후 연돌까지 저온부식이 우려되었다. 특히 염소성분이 비산재로 흡수되는 비율은 약 60% 정도로 나타났으며 RDF를 성형할 때 사용하는 소석회 등이 염소성분을 흡수하는 기능을 하고 이들이 쉽게 비산하여 백필터재나 또는 백필터를 통과하는 미세 먼지로 연돌에 퇴적되는 것으로 판단하였다.

3-4. 배연특성

NOx, SO₂ 가스분석은 ABB 사 on-line 가스분석기 URAS 14-1, 14-2를 사용하여 실시간 분석하였으며, HCl은 TOA 사의 염소가스 분석기를 사용하였다. Fig. 11은 K-RDF 연소과정에서 발생하는 배연특성을 나타낸 결과이며 산소농도는 약 O₂ 10%를 보이고 있다. 나머지 배연의 수치는 12% O₂ 기준으로 환산하였다. NOx는 약 80 ppm 이하에서 나타나고 있고 SO₂는 5 ppm 보다 낮게 나타난다. TSP(Total Suspended Particle)는 20 ppm 이하이나 운전 중 TSP 농도가 갑자기 변하는 경우가 나타나는데 이는 배가스 측정 Tube에 누적되어 있던 bag filter의 pulse air에 의하여 분진 농도가 순간적으로 변동하기 때문이다. NOx의 경우 대기환경 보전법 시행규칙 별표 8에 의거한 질소 산화물의 배출조건 고품연료제품 시간 당 2 ton 이상 시설의 기준 70 ppm (12% O₂)를 맞추기 위해서는 순환유동층 방식의 보일러에서는 연소공기의 다단주입 기술에 의한 제어 기술이 가장 간편한 방법이다. 연료 중 질소성분의 NO로의 전환율은 12% 전후로 나타났다[6]. SOx의 경우는 규제치(30 ppm (12% O₂)) 보다 매우 낮았으며 연료중 황의 전환율은 약 45% 이었다. 미세분진은 백 필터의 성능에 좌우되는 값으로 환경기준의 경계값(20 mg/Sm³)을 타나내었다. HCl은 250 ppm 전후에서 일정한 농도로 배출되었다. 연료 중 Cl 성분이 가스로 전환되는 비율은 약 40% 였

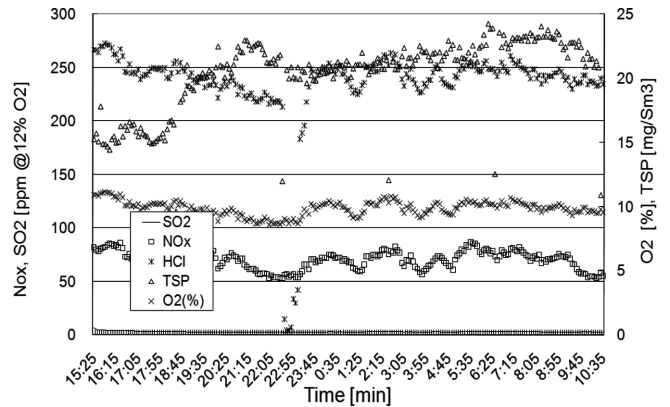


Fig. 11. Emission profile from K-RDF combustion.

다. 나머지는 연료 중 고체성분에 흡수되는 것으로 나타났으며 비산재에 높은 농도로 검출되었다. 배출 허용기준을 맞추기 위해 습식 scrubber를 배가스 출구단에 장착하여 수 ppm 수준으로 제어하였다[7,8].

3-5. 열전달 특성

상용 순환유동층 보일러 설계인자인 각 전열관의 열전달 계수를 연소운전 자료를 분석하여 도출하였다. Fig. 12에 water wall의 열전달 계수를 나타내었다. 총괄 전열계수(kcal/m²-h-K)는 $U=Q/A \times (T_2-T_1)$ 으로부터 구해진다. 여기서 T₂는 연소로의 가스상 온도이며 T₁는 증발관 내 물의 온도이다. Water wall의 총괄 열전달 계수는 중간 값이 100 kcal/m²-h-K를 나타내었으며 이는 상용 석탄보일러의 열전달 계수 보다 매우 낮은 값을 보여주었다. 이는 시험 운전이 설계 부하의 50~85%에서 수행되었고 이에 따라 연소로의 온도가 전반적으로 100% 부하일 때 보다 낮게 나타나기 때문에 낮은

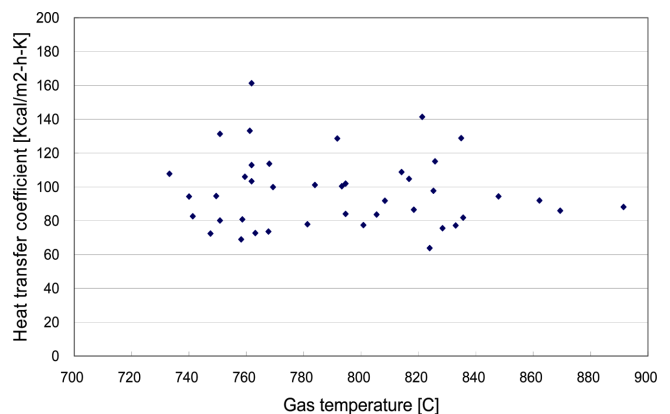


Fig. 12. Overall heat transfer coefficient of water wall tubes.

Table 4. Analysis of solid residues after combustion

	H ₂ O	V.M.	F.C.	Ash	C	H	N	S	Cl
Fly ash	0.25	0.19	2.74	96.82	0.18	0.07	0.15	0.40	2.01
Economizer	5.89	2.20	0.95	90.96	0.20	0.21	0.21	0.21	1.31
Stack floating matter	8.89	21.24	7.19	62.68	5.37	1.45	0.40	0.19	7.41
Stack fly ash	2.5	20.49	8.0	69.0	3.61	1.35	0.59	0.18	10.16

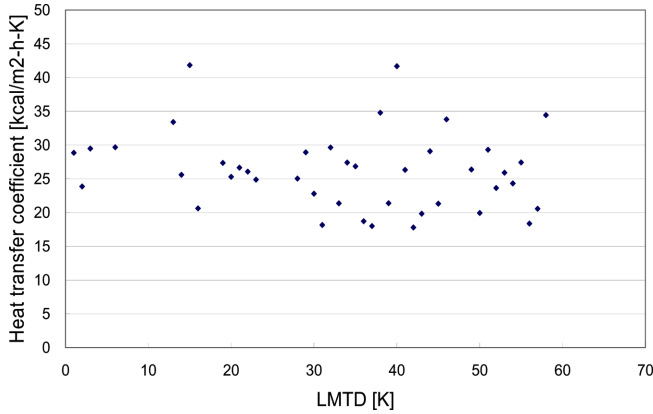


Fig. 13. Overall heat transfer coefficient of superheater tubes.

연소로 온도가 열전달 계수에 반영되었다. 그러나 예측값인 초기 설계값 130 kcal/m²-h-K를 크게 벗어나는 값은 아니었다.

대류 전열부에는 과열기와 절탄기가 위치해 있다. Fig. 13에 과열기의 열전달 계수를 LMTD에 관하여 나타내었다. LMTD는 관벽의 열전달 계수 측정을 위한 배가스 부분의 상하류와 열교환기 입출구 간의 로그 평균온도차 이다. 총괄 전열계수(kcal/m²-h-K)는 $U=Q/A \times LMTD$ 로부터 구해진다. 과열기의 전열계수는 25 kcal/m²-h-K 전후의 값을 나타내었다.

4. 결 론

순환유동층 RDF 연소 발전 기술을 개발하기 위하여 1 MWe급에 해당하는 증기량 8 ton/h급 순환유동층 보일러를 개발하고 시운전을 하였다. 시운전을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 성형 K-RDF나 비 성형 D-RPF의 연소특성은 매우 좋은 편으로 99% 이상의 연소율을 나타내었다.
- 비 성형 RPF 경우 제조과정에서 이물질이 완전히 제거되지 않을 경우 유동층에서 유동 장애를 일으킬 우려가 있는 것으로 판단되었다.
- 연소로의 온도 변화에 비해 증기 온도 변화는 매우 작았고 온도가 거의 일정함을 나타내었다. 발전용 증기로 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다.
- 염소는 비산화나 스택에 침적한 샘플에 농축되어 있었다. 따라서 백필터 이후의 설비에 관하여는 부식 방지가 중요하다고 판단하

였다.

- 연소로의 증발기 열전달 계수는 100 kcal/m²-h-K 정도로 석탄 유동층 보일러 보다는 작은 값을 나타내었다.
- 과열기의 증발계수는 25 kcal/m²-h-K 정도의 값을 나타내었다.

본 설비의 운전결과는 상용 보일러의 설계[9]를 위한 위와 같은 중요한 변수나 참고자료로 이용할 수 있다.

감 사

본 연구는 지식경제부 에너지기술 평가원 신재생에너지 기술개발 사업지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. Ministry of Environment, "Amendment of the Enforcement Decree of the Waste Control Act," ME Decree 220(2006).
2. Ministry of Environment, "Amendment of the Enforcement Decree of the Clean Air Conservation Act," ME Act 8207(2007).
3. Basu, P., "Combustion and Gasification in Fluidized Beds," CRC Press(2006).
4. Shun, D., Bae, D. H., Lee, S. Y. and Kim, M. S., "Development of CFB RDF Combustion and Co-generation Demonstration Plants," *The ninth Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactors.*, 79-84(2004).
5. Shun, D., Bae, D. H., Lee, S. Y. and Jo, S. H., "Circulating Fluidized Bed Combustion of Refuse Derived Fuel," *J. Korean Inst. of Resources Recycling*, **15**(1), 58-65(2006).
6. Shun, D., Bae, D. H., Jo, S. H. and Lee, S. Y., "Combustion of Coal in a Bench Scale circulating Fluidized Bed Unit," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **40**(3), 345-350(2002).
7. Shun, D., Bae, D. H., Jin, K. T., Lee, C. K., Park, J. H., Han, K. H., Jo, S. H., Ryu, H. J. and Lee, S. Y., "Development of Circulating Fluidized Bed Cogeneration System for RDF," *Research paper of Korea Institute of Energy Research.*, KIER-A66705 (2007).
8. Lee, H. S., Yun, J. K., Bae, D. H. and Shun, D., "Pollutants Emitted from Municipal Solid Waste Incineration," *J. Korean Society of Waste Management.*, **21**(4), 369-377(2004).
9. Shun, D., Bae, D. H., Kim, D. C. and Park, H. C., "Feasibility Assessment to Construct a Circulating Fluidized Bed Combined Heat and Power Supply Boiler System," *J. Korean Society of Waste Management.*, **23**(1), 81-90(2006).