

실험실규모 순환유동층에서 RDF와 RPF의 연소 특성에 관한 연구

이재성* · 이응록** · 안민하† · 박상욱* · 신동훈*** · 황정호*

Combustion of RDF and RPF in a Lab-Scale Circulating Fluidized Bed

J. S. Lee*, E. L. Lee**, M. H. An†, S. U. Park*, D. Shin*** and J. Hwang*

ABSTRACT

Combustion of refuse derived fuel(RDF) and refuse plastic fuel(RPF) was carried out in a lab-scale circulating fluidized bed. Experiment was investigated cold flow visualization. RDF was made by C & tech and RPF was made by KRS. The results include distribution of temperature in the combustion chamber, and concentrations of flue gas such as O₂, CO₂, CO, NO_x, and HCs. Micro G.C(gas chromatograph) was employed to find out concentration of HC. Temperature distribution was different when RDF and RPF were burnt respectably. As air ratio became increased, CO₂, CO, and total of HCs emissions were decreased. According to the number of carbon atom of HCs, HC were classified as five kinds of HC.

Key Words : Circulating Fluidized Bed, Refuse Derived Fuel, Refuse Plastic Fuel, Air ratio, CO₂, CO, HC(Hydro carbon), NO_x

기 호 설 명

RDF Refuse derived fuel
RPF Refuse plastic fuel

HHV High heat value
G.C Gas chromatograph

1. 서 론

우리나라의 경우 대체에너지생산량의 90% 이상을 폐기물에너지가 차지하고 있다[1]. 대표적 폐기물에너지로 RDF(Refuse Derived Fuel)와 RPF(Refuse Plastic Fuel)가 있다. RDF는 도시 폐기물을 고형연료화 한 것으로 발열량을 조절할 목적으로 플라스틱을 첨가한다. RPF는 중량기준으로 폐플라스틱을 60% 이상 첨가하여 만든 고형

연료이다. 우리나라에서는 RPF의 경우 환경부고시 제 2003-127호에서 품질과 사용처에 대한 기준이 정해져있으나 RDF의 경우는 아직 연료로써 기준이 마련되어 있지 않고 있다. 하지만, 미국과 일본 등 외국의 경우 RDF를 연료로 발전을 하고 있으며, 우리나라도 RDF를 연료로 하는 화력발전사업에 대한 타당성 및 RDF제조와 RDF연소장치에 대한 연구가 진행 중이다[2]. RDF와 RPF의 연소로로는 순환유동층식이 적합한 것으로 알려져 있다[3]. 이는 순환유동층 연소로가 높은 기상유속에서 조업이 되기 때문에 고체입자의 재순환이 격렬하게 이루어지고, 기체 흐름이 단방향 유동(plug flow)으로 유지되기 때문에 기포유동층에서처럼 기포에 의한 기체의 우회(bypassing)가 없어 기-고체의 접촉효율이 높

* 연세대학교 기계공학과

** 한국가스공사

† 연락저자, hwangjh@yonsei.ac.kr

*** 연세대학교 CT(Clean Tech.) 연구단

고 균일하여 높은 연소효율을 가진다는 장점이 있기 때문이다[4]. 이 외에 다음과 같은 장점들이 있다. 첫째는 회분과 수분의 함량이 비교적 높은 저급 및 저열량의 연료를 포함한 다양한 연료의 연소에 적용시킬 수 있는 장점이 있다. 둘째, 별도의 탈황 장치가 필요 없으며, 연소로에 직접 석회석을 투입하여 연소 중 탈황반응을 시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 기존의 기포유동층 보일러에 비해 기-고체 접촉효율이 매우 높아 같은 칼슘/황 몰비로부터 더 높은 탈황효율을 갖는 특징이 있다. 셋째, 비교적 낮은 온도에서 연소가 이루어지기 때문에(850-950℃) NOx의 생성을 억제할 수 있는 장점이 있다. 별도의 공해 방지시설이 없이 SOx와 NOx 모두 100-200ppm 정도로 조절이 가능한 것으로 알려져 있다[5,6].

순환유동층연소에 관한 기초연구로는 Das & Bhattacharya[7]등을 들 수 있으며, 근래에는 Tagashira 등[8]이 순환유동층에서 RDF 연소특성연구를 수행하였고, Dong 등[9]이 도시고형폐기물과 석탄의 혼합연소에 대하여 연구를 수행하였다. 순환유동층을 이용한 발전설비의 상용화의 예로는 미국, 이탈리아 그리고 일본의 발전설비를 들 수 있다[3]. 우리나라의 경우, RDF 활용에 있어 RDF보일러사와 한국환경산업(주)가 공동으로 시설원예용으로 개발한 소규모 온수보일러(RDF연소용량 약 80kg/h)를 20여기 생산하여 보급한 사례가 있으며, 삼성엔지니어링에서 유동층 연소장치에서 슬러지와 RDF를 함께 연소시키는 기술개발에 착수하였다.

본 연구는 국내에서 만들어지고 있는 RDF와 RPF를 순환유동층 연소로에서 연소하여 순환유동층 설비의 설계 및 운영 시 활용 가능한 실험 데이터를 확보하는데 목적이 있다. 이를 위해 실험실규모의 순환유동층 연소로를 제작하였으며, RDF 및 RPF를 연소시켜 가스분석기와 Micro G.C를 이용하여 연소가스를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 실험 장치 구성에 앞서 아크릴 재질로 순환유동층 냉간 장치를 제작하여 유동에 대한 선행실험을 하였다. 그 결과 값을 근거로 순환유동층 열간 장치를 제작하였고, 실험 장치를 구성하였다. Fig. 1은 냉간 장치와 열간 장치의 유동에 대한 실험 결과 값이다. 압력차의 값은 식(1)로 표현된다.

$$\Delta P = \epsilon_s (\rho_s - \rho_g) g L \quad (1)$$

여기서, ΔP , ϵ_s , ρ_s , ρ_g , g , L 은 각각 압력차, 유동

사분율, 유동사 밀도, 유동화가스 밀도, 중력가속도, 측정 압력탭 사이의 거리를 나타낸다. ρ_s , ρ_g , g , L 은 측정할 수 있거나 정해진 값이기 때문에 ΔP 를 측정하면 식(1)을 이용하여 상승부내의 유동사의 분율을 알 수 있다. Fig. 1에서 고체공탐 속도(superficial velocity)가 1m/s 이상으로 증가함에 따라 압력차의 값이 급격히 적어지는 현상을 보이는데, 이 현상은 상승부내의 유동사의 분율이 적어진 것을 의미하고 이는 상승부 내에서만 유동을 하던 유동사가 유동화 가스와 함께 상승부 밖으로 나가 싸이클론에서 유동화 가스로부터 분리되어 하강부와 루프셀을 거쳐 상승부로 다시 유입되면서 순환을 시작하기 때문이다. 이 결과 값으로 순환유동층 열간 장치에서 유동사의 유동이 원활히 이루어진다는 것을 알 수 있고, 유동사 순환조건, 즉 적정 공탐 속도를 알 수 있었다.

본 연구의 실험 장치 개념도는 Fig. 2와 같다. 실험장치는 압축공기 공급부, 공기 예열장치, 순환유동층 연소로, 연소가스 분석장치, 온도 및 압력측정기, 습식 스크러버, I.D Fan으로 구성되어 있다.

공기 예열기는 상승부내의 유동사를 350-400℃로 예열하여 보조연료인 톱밥의 연소를 위해 설치하였다. 연소로는 상승부와 싸이클론, 하강부, 루프셀로 구성되어 있으며, 연소로 전체 외벽에는 세라믹 울로 단열처리 하였다. 상승부 내경은 0.102m이고 높이는 2.52m이다. 연소가스와 유동사를 분리시켜주는 싸이클론은 표준설계비로 설계, 제작하였으며 기준 내경은 0.12m이다. 하강부의 내경은 0.04m이다. 싸이클론으로부터 분리된 입자를 상승부로 순환시켜주는 루프셀의 내경

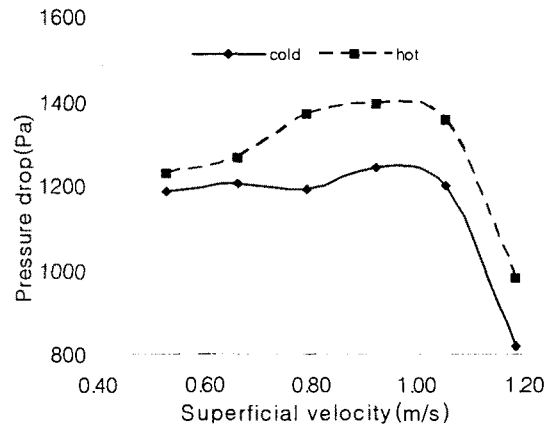


Fig. 1 Pressure drop with superficial velocity in cold and hot devices

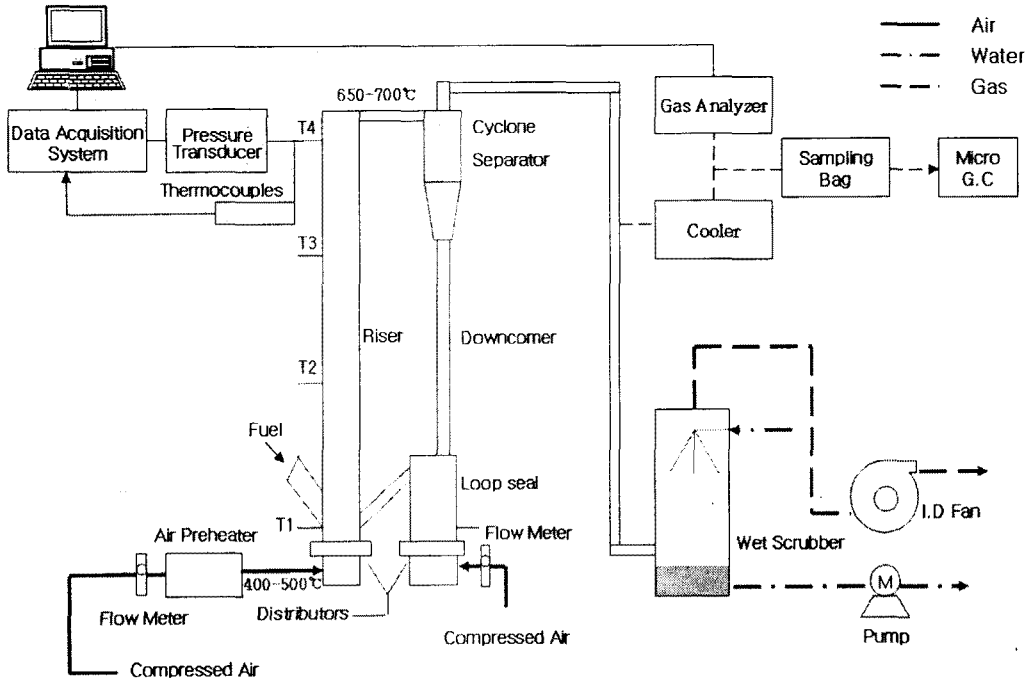


Fig. 2 Schematic diagram of experiment set up

은 0.153m이고 높이 0.47m이다. 상승부와 루프셀에 사용한 노즐은 트위어를 각각 4개, 3개를 정방향으로 설치하였다. 연료투입구는 상승부에 높이 0.3m 위치에 설치하였다. 온도와 압력을 측정하기 위해 상승부에 4개의 포트를 만들고 압력 탭과 K-형 열전대를 설치하였다. 연소 후 배출되는 연소가스는 가스분석기(GreenLine Mk2)와 Micro G.C(Agilent 3000 Micro Gas Chromatograph)를 이용하여 CO, CO₂, O₂, NO_x, HC(Hydrocarbon)을 측정하였다. Micro G.C 사용 시에는 연소가스를 샘플링 백에 채취하여 분석하였다. 연소용 공기는 상승부와 루프셀에 각각 공급하고, 이 중에서 상승부에 공급되는 공기는 공기예열기를 통하여 예열되어 공급된다. 상승부 출구로 배출된 연소가스와 유동사는 사이클론에서 분리되고 유동사는 하강부와 루프셀을 거쳐 상승부로 재유입 되어 순환하고, 연소가스는 습식 스크러버를 거쳐 I.D Fan을 통하여 외부로 배출된다. 습식 스크러버는 연소가스의 온도를 낮춰 I.D Fan의 고장을 막기 위해 설치하였다. 냉매로 상온의 물을 사용하며, 펌프를 이용하여 배수시킨다.

2.2 실험방법

연소실험은 먼저 유동사($d_s = 150-500\mu m$, $\rho_s = 2,670kg/m^3$)를 주입한 후 예열된 공기를 공급한다. 총내 온도 T1이 400°C가 되면 보조연료인 톱밥을 넣고 연소 시켜 총내 온도를 700°C가 될 때까지 가열시킨 후에 RDF 또는 RPF를 투입하였다. 실험은 Table 1에 나타난 바와 같이 연료의 투입량을 조절하여 과잉공기비(excess air ratio)를 변화시키며 수행하였다. 과잉공기비는 완전연소가 된다는 가정 하에 식(2)를 이용하여 먼저 공연비(Air/Fuel ratio)를 구하고, 계산된 이론공기량에 대한 실제 공급되는 과잉공기량의 비로 나타낸다.

$$C_a H_b O_c N_d S_e + \left(a + \frac{b}{4} + e - \frac{c}{2}\right) (O_2 + 3.76 N_2) \rightarrow a CO_2 + \frac{b}{2} H_2 O + e SO_2 + \frac{d}{2} N_2 + \left(a + \frac{b}{4} + e - \frac{c}{2}\right) \times (3.76 N_2) \quad (2)$$

A/F ratio

$$\frac{\left(a + \frac{b}{4} + e - \frac{c}{2}\right) (M_{O_2} + 3.76 M_{N_2})}{a M_C + b M_H + c M_O + d M_N + e M_S}$$

여기서, a, b, c, d, e는 각각 연료 중 포함하고 있는 탄소, 수소, 산소, 질소, 황의 함량을 중량 퍼센트(wt %)로 나타낸 값이며, M_i 는 각 원소의 분자량을 나타낸다.

Table 1 Experiment condition

Parameters	Range
Excess air ratio	1.15-1.71
Pressure drop (Pa)	800
Superficial velocity (m/s)	1.17

2.3 연료특성

본 연구에서 사용된 RDF와 RPF는 연료투입구 크기 때문에 가로세로 2cm로 분쇄하였다. 분쇄한 RDF와 RPF의 무게측정결과 RDF가 약 3배 가량 무겁게 측정되었다. RDF는 대부분이 종이류로 구성되어 있고, 발열량 조절을 위해 플라스틱을 첨가한다. RPF의 경우 환경부 고시에 의해 60%이상의 폐플라스틱을 함유하여 제작되었고 대부분이 비닐류로 되어있다. Fig. 3과 4는 RDF와 RPF의 만들어진 상태와 분쇄된 상태의 사진이다.

RDF와 RPF의 공업분석치와 원소분석치를 Table 2에 나타내었다. 발열량에 대한 측정은 별도로 하지 않고 Dulong식을 사용하여 계산하였으며, 계산식은 다음과 같다[11].

Dulong 식 :

$$HHV = 8100C + 34000(H - \frac{O}{8}) + 2500S [kcal/kg] \quad (3)$$

Table 2 Composition of the RDF and RPF

Proximate analysis	RDF(wt, %)	RPF(wt, %)
Moisture	3.6	1.6
Combustibles	87.4	89.85
Ash	9	8.55
Ultimate analysis	RDF(wt, %)	RPF(wt, %)
C	54.9	70.2
H	7.13	11.8
O	18.18	7.1
N	0.06	0
S	0	0
Calorific value	RDF(kcal/kg)	RPF(kcal/kg)
HHV	6098.45	9461.25



Fig. 3 Picture of RDF

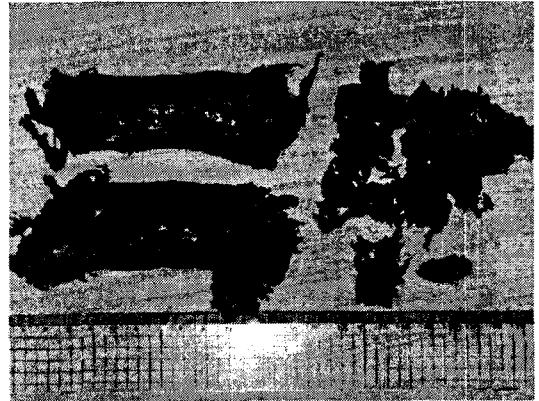


Fig. 4 Picture of RPF

3. 결과 및 토의

3.1 온도분포

Fig. 5와 6은 각각 RDF와 RPF 연소 시 연소로 높이에 따른 온도 분포를 나타낸 것이다. 실험에서 관측된 연소로의 높이에 따른 온도 분포는 연료별, 과잉공기비별 다르게 나타났다. RDF의 경우, 높이에 따라서는 높이 0.16m에서 가장 온도가 높게 나타났다. RPF의 경우에는 RDF의 경우와는 다르게 높이 0.8m에서 온도가 가장 높게 나타났다. 온도 또한 900℃정도로 높게 나타났다. 이는 RPF의 경우 폐 플라스틱의 대부분이 비닐류이고 가벼워 유동화 가스에 의해 상승된 RPF가 높이 0.8m에서 연소가 진행되고 발열량 또한 RDF보다 높기 때문에 0.8m 높이에서 더 높은 온도가 측정되는 것으로 판단된다. 과잉공기비가

커질수록 층의 온도는 RDF와 RPF 연소 시 모두 내려가는 것을 확인하였다. 연소로에서 측정된 가장 높은 온도와 낮은 온도의 차이는 RDF의 경우 220°C로 나타났고, RPF의 경우에는 216°C로 나타났다.

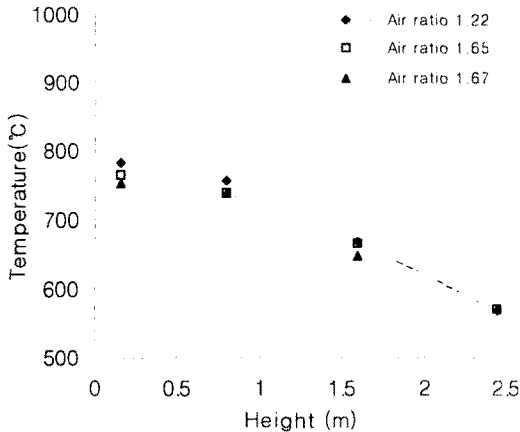


Fig. 5 Temperature distribution (RDF)

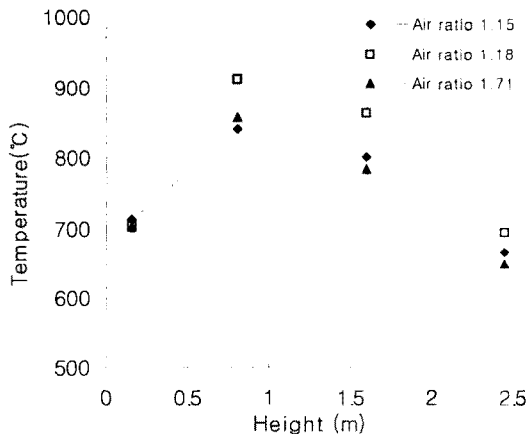


Fig. 6 Temperature distribution (RPF)

3.2 배가스 농도

3.2.1 O₂, CO₂, CO, NO_x

NO_x를 제외한 가스들의 농도는 과잉공기비가 늘어남에 따라 줄어들어드는 것을 Table 3의 실험 결과를 통하여 알 수 있다. NO_x의 경우는 연소로 내 최고 온도가 높게 측정됨에 따라 그 농도가 높아진다.

본 실험에서는 CO의 농도가 %단위로 높게 나타났다. RDF와 RPF의 CO의 배출량을 비교 해

보면, 더 낮은 과잉공기비 임에도 불구하고 RPF 연소 시에 배출되는 CO의 농도가 더 낮게 나타났다. 이는 RDF보다 RPF가 더 좋은 연소반응성을 가지고 있기 때문이라 판단된다.

Table 3. Flue Gas Comparison

Fuel	Excess air ratio	Concentration			
		O ₂	CO ₂	CO	NO _x
RDF	1.22	4%	11.8%	9.4%	227ppm
	1.65	8.9%	7.9%	3.7%	140ppm
	1.67	9%	7.1%	2.6%	79ppm
RPF	1.15	2.5%	10.5%	5.9%	119ppm
	1.18	3.2%	10.6%	5.4%	244ppm
	1.71	9.3%	6.7%	2.5%	144ppm

3.2.2 HC

본 연구에서는 연료의 미연물질인 HC를 측정하기 위하여 Micro G.C를 사용하여 측정 가능한 HC의 배출 농도를 측정하였고, Table 4에 그 종류와 배출농도를 나타내었다.

종류별 HC의 농도는 과잉공기비에 따라 각각 다른 값을 가지지만, 총 배출되는 HC의 농도는 과잉공기비가 커짐에 따라 낮아졌다.

배출된 HC를 탄소와 수소의 결합에서 탄소의 개수에 따라 HC의 배출 농도를 구분하여 보면, Fig. 7과 8같이 나타나며, 주로 탄소의 개수가 적은 HC가 많이 발생함을 알 수 있다. 과잉공기비의 변화에 따라서 탄소 원자 1, 2, 3개와 결합된 HC의 경우 감소하는 경향을 보이거나, 탄소 원자 4, 5개와 결합된 HC의 경우는 증가하는 경향을 보이고 있다.

4. 결론

순환유동층 연소로를 이용하여, RDF와 RPF를 연료로 하여 과잉공기비를 변화시키며 실험을 수행하였다.

1) 연소로 내부의 온도분포는 RDF의 연소 시 높이 0.16m에서 가장 높은 온도가 측정되었으며, 높이가 높아짐에 따라 온도가 떨어졌다. 또한, 과잉공기비가 클수록 층의 온도가 내려갔다. RPF의 경우 높이 0.8m에서 가장 높은 온도가 측정되었으며, 층의 온도는 RDF의 연소 시보다 낮았다.

2) 배출 가스의 농도를 볼 때 NO_x를 제외한 CO₂나 CO의 배출 농도는 RDF와 RPF 연소 시

Table 4. Concentration of HCs (Unit : %)

HC	Air ratio of RDF			Air ratio of RPF		
	1.22	1.65	1.67	1.15	1.18	1.71
Methane	4.12235	1.32151	0.48054	3.34204	2.52744	0.99624
Ethylene	3.82762	1.0722	0.34864	3.94136	2.57909	1.01368
Ethane	0.35987	0.07079	0.03328	0.28341	0.22704	0.04397
Acetylene	0.33226	0.21231	0.04383	0.35412	0.27336	0.179
Methyl acetylene	1.29027	1.18019	1.43013	1.08645	1.10043	1.06415
Propane	0.0707	0.04854	ND	0.03114	0.03114	ND
1,2-Propadiene	ND	ND	ND	1.11323	ND	ND
n-Butane	0.22918	0.14334	0.21698	0.08572	0.08572	0.31616
trans-2-Butene	0.25651	0.05512	0.13711	0.00024	0.00021	0.36794
iso-Butylene	0.15735	0.05525	0.16573	0.0005	0.00074	0.27386
1-Butene	0.17945	0.05668	0.1895	0.00146	0.00228	0.33611
cis-2-Butene	0.53229	ND	0.61164	ND	ND	ND
1,3-butadiene	0.07845	0.00037	0.03292	0.00089	0.00074	0.1579
2-methyl-2-butene	ND	0	0.01049	0.00001	ND	0.01843
iso-butane	0.06317	ND	ND	ND	0.05984	ND
trans-2-pentene	0.01651	0.00001	0.01112	ND	ND	0.0949
1-pentene	0.01692	ND	0.00463	0.00001	ND	0.14552
cis-2-pentene	0.003	ND	ND	ND	ND	ND
iso-pentane	ND	0.00001	ND	ND	ND	ND
n-pentane	ND	0.00001	0.04388	0.00002	0.00002	ND
cis-2-pentene	ND	ND	ND	ND	0	0.033
Total	11.5359	4.21633	3.76042	10.2406	6.88805	5.04086

*ND : Non detected

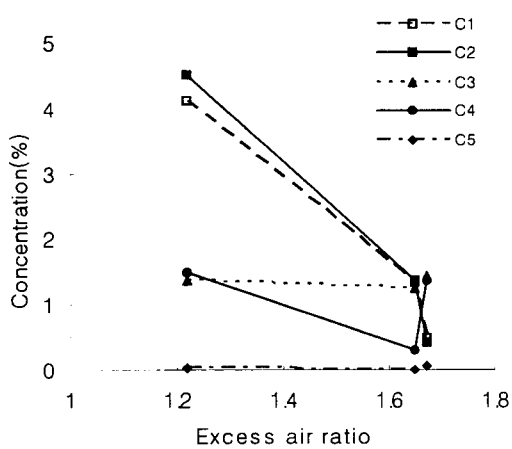


Fig. 7 Emission of HCs (RDF)

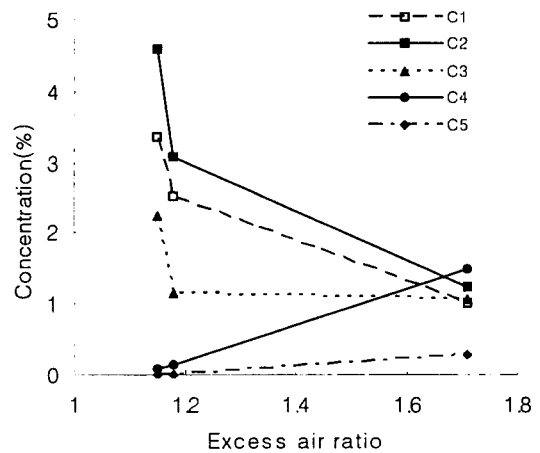


Fig. 8 Emission of HCs (RPF)

과잉공기비가 증가함에 따라 모두 줄어들었으며, RPF의 연소 시에 더 적은 양의 CO가 배출되었다. NO_x의 경우는 연소로 내 온도가 가장 높을 때 배출농도가 가장 높았다.

3) HC의 배출 농도는 총량기준으로 과잉공기비가 커짐에 따라 적어졌으며, 결합된 탄소 원자의 개수에 따라 구분해 볼 때, 탄소 원자가 1, 2, 3개인 경우 과잉공기비가 늘어남에 따라 농도는 줄었고, 탄소 원자가 4, 5개인 경우는 그와 반대로 점점 늘어났다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업(KRF-2002-041-D00072)의 일환으로 진행되었습니다.

참고문헌

- and Management, Vol. 43, pp. 2189-2199, 2002.
- [10] 환경연구회편, '고체 폐기물 소각로 - 계획과 설계', 문지사, 1993.
- [1] 산업자원부, '대체에너지 개발보급 3개년 계획', 대체에너지개발보급 대토론회자료, 2000
- [2] 최연석, 김석준, 최갑석, 권영배, 김부웅, "폐기물 고형연료(RDF)를 활용한 화력발전사업 타당성 연구", 한국폐기물학회지, Vol. 18, No.4, 69-79, 2001
- [3] 김우현외, "폐기물 고체연료(RDF)의 유동층 연소기술", 제 24회 KOSCO Symposium 논문집, pp.220-236, 2002
- [4] Yerushalmi, J.: in "Circulating Fluidized Bed Technol.", eds. by P. Basu, Pergamon Press, New York, 97, 1968.
- [5] 산업자원부, '순환유동층 보일러에서의 입자 및 마모 특성 연구', 2002
- [6] Shun, D. et al, "Operation characteristics of commercial circulating fluidized bed boilers", Theories and Applications of Chem. Eng., Vol. 2, pp. 809-812, 1996.
- [7] Das, A. & Bhattacharya, S. C., "Circulating Fluidised-Bed Combustion", Applied Energy, Vol. 37, pp. 227-246, 1990.
- [8] Tagashira, K., Torii, I., Myouyou, K., Takeda, K., Mizuko, T., Tokushita, Y., "Combustion characteristics and dioxin behavior of waste fired CFB", Chemical Engineering Science, Vol. 54, pp. 5599-5607, 1999.
- [9] Dong, C., Jin, B., Zhong, Z., Lan, J., "Test on co-firing of municipal solid and coal in a circulating fluidized bed", Energy Conversion