

燃焼方式別 廢棄物 고형연료(RDF)의 燃焼特性 研究[†]

*金 宇 顯

한국기계연구원

A Study on Combustion Characteristics of Refuse Derived Fuel(RDF) in Various Incinerators[†]

*Woo-Hyun Kim

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

요 약

폐기물고형연료(RDF : Resused Derived Fuel)를 연료로 하는 연소기술의 개발을 위하여 기포유동층 연소로와 순환유동층 연소로, 연속연소식 연소로, 회분식 연소로 등 다양한 연소장치를 이용하여 연소 특성실험을 하였다. 여러 종류의 연소설비에서 RDF의 연소 및 배출가스 특성을 비교, 분석하였으며 RDF 전용 연소설비에 대하여 보다 깊은 연구의 기초 자료로 활용하고자 하였다. 기포유동층 및 순환유동층연소로에서는 적정투입량과 가스공압속도등 적정운전조건에 따라 안정적인 연소가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 순환유동층 연소로에서 연소조건에 따라 연료 중의 질소성분과 연소공기 중의 산소와의 반응이 커져서 NOx의 농도가 높아지는 것을 알 수 있었으며 SO₂는 매우 낮은 농도로 측정되어 RDF의 유동층 연소시 거의 발생하지 않는 것으로 판단되었으며, HCl의 경우 평균 36.4ppm으로 배출허용기준치보다는 낮으나 저감대책이 필요한 것으로 판단되었다. 연속연소식 연소로와 회분식 연소로의 경우 성형 RDF와 fluff RDF를 비교 실험한 결과 높은 밀도를 가진 성형 RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리한 것을 알 수 있었으며 배가스 특성은 비슷한 값을 나타내었으며 배출가스 특성은 비슷하였다.

주제어 : 폐기물고형연료, 기포 및 순환유동층연소로, 연속연소식 연소로, 가스공압속도

Abstract

For the development of combustion technology of RDF(refuse derived fuel), combustion characteristics are examined in bubbling fluidized bed, circulating fluidized bed, continuous combustor and batch type combustor. The characteristics of combustion and exhaust gas has been compared and analyzed in many type of combustion facilities, which has been utilized as basic data for the advanced research of specified RDF combustion facility. Stable combustion has been observed in bubbling and circulating fluidized bed from controled operating condition like the proper feeding rate and superficial gas velocity. In circulating fluidized bed, concentration of NOx has been increased with the operating condition by the fuel-NO and oxygen reaction and SO₂ can be considered not to be produced in RDF fluidized bed from very low concentration in flue gas. HCl concentration is 36.4 ppm as average value and lower than standard emission value, but the counter plan is needed. Shaped RDF and fluff RDF have been compared in continuous combustor and batch type combustor and shaped RDF shows benefit for the stable heat recovery and gas emission shows similar value and characteristics.

Key words : RDF(refuse derived fuel), bubbling and circulating fluidized bed, continuous combustor, superficial gas velocity

1. 서 론

국가경제의 발전에 기본적 요소가 되는 에너지자원의

확보는 어느 국가를 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 이

[†] 2005년 11월 11일 접수, 2006년 1월 11일 수리

*E-mail: kwh0788@kimm.re.kr

용보급촉진법'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. 여러 가지 대체에너지원 중에서 폐기물에너지는 국내 총 대체에너지의 90% 이상을 차지하며 대체에너지 공급에 절대적인 기여를 하고 있는 것으로 나타났다^{1,2,3)}. 아직도 70% 이상의 폐기물에너지가 잠재된 것으로 추정되므로 폐기물에너지의 적극적인 활용 여부가 향후 대체에너지정책의 성공에 중요한 역할을 할 것으로 보여 진다. 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 중소 지자체가 단순 소각이나 매립처리로 폐기물에너지를 낭비하고 있다. 그러나 주변의 중소도시에서 자체의 가연성폐기물을 수송과 저장에 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^{5,6)}.

한편, 폐기물은 처리 측면에서 보면 환경문제와도 관계가 있으므로 반드시 '환경친화적인 폐기물에너지 회수'가 가능한 기술을 개발하여 보급하는 것이 필요하다. 선진국에서는 이미 RDF기술을 이용하여 환경보전 효과를 기대하면서 대체에너지를 확보하는 이중의 효과를 얻고 있으며 폐기물에너지를 이용한 발전단가는 50~60원/kWh 정도로서 태양력이나 풍력 발전보다 매우 저렴한 것으로 분석되고 있다.

현재 국내에서는 에너지관리공단에서 대체에너지기술

개발 사업의 하나로 RDF의 대체에너지 연료화에 따른 RDF에너지의 보급화에 많은 노력을 기울이고 있으며 RDF 제조기술은 꾸준한 기술개발로 사업화가 가능한 수준에 도달해 있으며 상용플랜트 건설이 몇 곳에서 검토단계에 있다⁷⁾. 그러나 환경친화적인 RDF 수요처가 없어서 연료로서 RDF의 보급이 지연되고 있으므로 적절한 해결책이 시급한 실정이다. RDF 자체가 폐기물을 원료로 하여 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 멀지않아 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 활용하고자 한다.

2. 각종 연소설비를 이용한 RDF의 연소실험

2.1. RDF/RPF 특성분석

2.1.1. RDF/RPF의 특성

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

Table 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 (g/cm ³)	0.9	Calorific value (kcal/kg)	4,969
total	100				

Table 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(Refused Plastic Fuel)

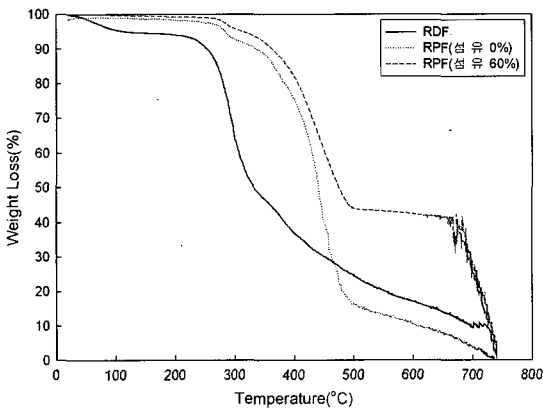


Fig. 1. RDF/RPF TG analysis.

2.1.2. RDF/RPF의 TG 분석

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

2.2. RDF 연소실험

2.2.1. 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)판으로 제작하였다. 연소로 상·하단부의 내경은 각각 300 mm, 200 mm로 상단이 100 mm 확장되는 형태로 상단 free board부에서 비산분진의 체류시간이 증가되도록 제작되었으며, 하단의 높이는 공기분산판으로부터 970 mm, 상단부의 높이는 1,567 mm이며 하단 plenum chamber 부분은 217 mm로 유동층 연소로의 전체 높이는 2,754 mm이다.

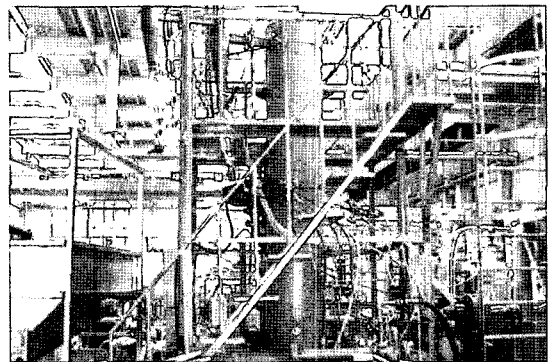


Fig. 2. Bench scale RDF fluidized bed combustor.

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

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

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

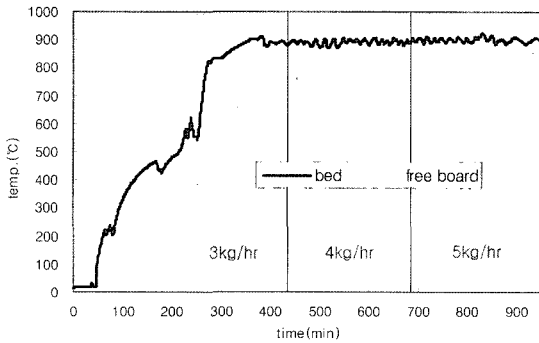


Fig. 3. Temperature distribution with feeding rate in stable state.

키는데 유리하게 하였다.

나. 실험결과 및 고찰

유동매체(주문진 규사 4호, 0.6 mm) 13 kg을 로내에 주입한 후 1차 공기를 공급하여 층을 유동화 시키고 LPG용 버너를 이용하여 착화, 승온시켜 유동층 온도가 약 400°C 이상이 되면 LPG를 공급하여 RDF가 연소될 수 있는 온도(약 600°C)까지 승온시켜 RDF를 주입한다. RDF를 주입하여 노내의 온도분포가 안정화되는 정상상태에 도달하게 되면 최적 연소조건을 찾기 위해 시료투입량, 1, 2차 공기공급량을 변화시켜 온도분포, 배가스 농도 등을 측정하였다. 실험조건은 Table 3과 같다.

Fig. 3은 bed층의 온도를 880~900°C로 유지하면서 RDF 투입량을 3, 4, 5 kg/hr로 했을 때 free board부의 온도 분포를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이 투입량이 3 kg/hr일 때 free board부의 온도는 약 700°C 정도였고 투입량을 4 kg/hr로 증가시켰을 때 900°C 까지 상승하였으나 시간이 지나면서 800°C 부근에서 안정화되었다. 그리고 투입량을 5 kg/hr으로 투입했을 경우엔 약 900°C 부근에서 안정화되는 것을 볼 수 있다. RDF는 휘발분이 많아 freeboard부의 온도가 낮게 되면 미연가스의 완전연소가 이루어지지 않아 HCl, CO, SOx 등 배가스의 농도가 높아질 가능성이 커진다. 따라서, 미연가스의 완전연소가 이루어지기 위해서는 free board부의 온도가 850°C 이상 유지하는 것이 중요할 것으로 판단되어 적정투입량을 5 kg/hr로 결정하였다.

Table 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
3 kg/hr	Uo=1.2 m/s (1st=575)	-	965	218	31
		100	375	216	20
		200	163	241	15
		300	214	252	11
4 kg/hr	Uo=1.2 m/s (1st=575)	-	951	164	124
		200	94	184	10
		300	184	185	12
5 kg/hr	Uo=1.2 m/s (1st=575)	-	459	202	34
		100	354	194	5
		200	95	184	3
		300	24	189	1
		400	35	205	1

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

2.2.2. 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)을 설치하였으며 공정도를 Fig. 4에 나타내었다. 연료 및 연소회재는 연소로, 사이클론 및 loop seal의 순서로 순환하며 연소로에서 일정량의 연소회재가 연소로 외부로 배출되게 된다. 연소공기는 air preheater에서 예열되어 연소로의 분산관으로 공급하였으며, 운

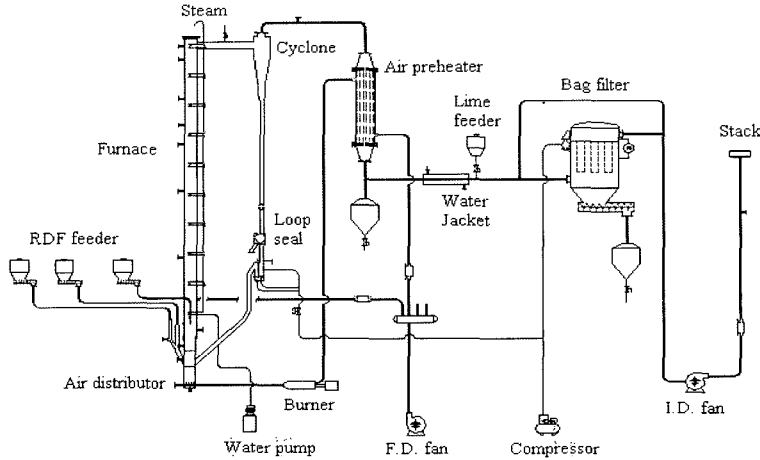


Fig. 4. Schematic diagram of CFBc pilot plant for RDF combustion.

전조건에 따라 2차공기를 연소로 상부인 free board부에서 최대 30%까지 공급하였다.

연소로에 정체층 높이인 0.4 m의 절반인 0.2 m 정도로 충물질(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 분산관을 통해 공급하여 free board부 압력을 대략 -10 mmAq 정도의 음압으로 유지하였다. 유동공기량을 서서히 증가시키면서 층내 압력강하를 확인하여 최소유동화 속도로 운전하였다.

유동층의 온도를 RDF의 발화점인 480°C 이상으로

예열하기 위해 분산관 전단에 LPG 버너를 연결하여 연소공기를 600°C 이상으로 증가시킨 후 공급하고 송풍기의 유량을 조절하여 공탑속도를 일정하게 유지하였다. 480°C 이상으로 충물질의 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 충물질인 모래를 정체층 높이인 0.4 m까지 서서히 투입하였다. 한편, 증기를 생산하기 위해서 설치한 열회수용 tube(이중관, 25A*180)에 소량의 물을 연속적으로 공급하였다.

연소실의 온도 분포는 RDF 공급량을 30 kg/hr로 고

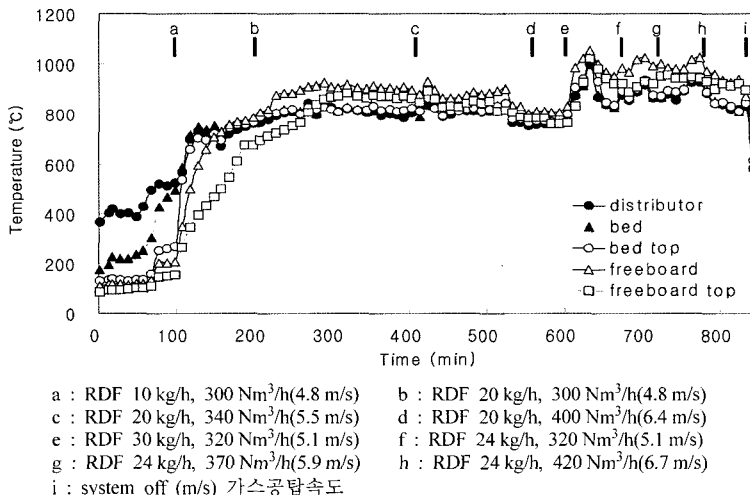


Fig. 5. Temperature profile in the CFBc for incinerating RDF.

정하였을 때, 800~950°C로 유지할 수 있었다. 온도분포가 안정화되면 연료량, 공기비, 공탑속도 등의 운전조건을 바꿔주면서 온도분포, 고체 순환량, 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 Fig. 5에 나타내었다. 유동층의 초기 승온을 위해서 보조버너(LPG)를 사용하였다. 보조 버너에 의해 600~800°C로 가열된 공기는 분산판을 통하여 유동층으로 인입하였다. 유동공기가 일정온도 이상 가열되면서 공탑속도가 증가되면, 유동이 더욱 원활하게 이루어진다. 본 실험에서는 운전시작 50분이 지나면서 활발한 유동층 혼합으로 bed 상부 온도가 급속하게 상승하는 경향을 나타내었다. 유동사가 RDF의 착화온도인 450°C에 이르면(a), 보조버너의 가동을 중단하고 RDF를 10 kg/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 20 kg/hr로 공급하였다(b). 연료량의 증가로 주탑(riser)의 전체적인 온도가 상승하였는데, bed의 온도는 800°C에서 형성되

었으며, free board부의 온도는 더욱 상승하여 900°C의 온도 분포를 나타내어 온도 분포가 이원화됨을 알 수 있었다. RDF의 공급량을 고정한 상태에서 공기량을 340 Nm³/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 400 Nm³/hr를 공급할 경우, 더욱 노내 온도가 균일화되었으며, 외부공기의 과량 공급으로 전체적인 온도는 800°C정도로 감소하는 경향을 나타내었다(d). 연소조건이 안정된 상태에서 연료량을 서서히 증가 시켜 30 kg/hr를 공급하였는데(e), 설계시 고려했던 연료량이 50 kg/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°C 이상으로 장시간 운전하기엔 무리가 있었다. 따라서 24 kg/hr의 공급량으로 안정적인 운전을 하면서 공기량을 320, 370, 420 Nm³/hr로 증가시켰다. 온도 분포는 공기량이 증가하는 순간에 다소 감소하였다가 10~20분 후 본래의 온도로 빠르게 안정화되는 경향을 나타내었다.

② 연소가스 분석

본 실험에서는 RDF 공급량 및 과잉공기비의 조절에

Table 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.**				
					O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO(ppm)	NOx(ppm)	SO ₂ (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

따른 배가스 조성 분석을 수행하였다. 시료의 채취는 굴뚝에서 하였으며, 연소로에서 발생하는 배가스를 처리 장치를 거치지 않은 상태에서(여과집진기 bypass) 채취, 분석하였다.

O₂, CO, CO₂, NO_x, SO_x 등의 배기가스는 연소조건별로 3회에서 5회씩 측정하여 평균하였으며, 결과를 Table 5에 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 30 kg/hr로 증가시킨 후 바로 측정된 결과 불완전 연소로 인한 CO 농도의 급격한 증가 현상이 발생하였다. NO_x의 경우 공기비의 증가에 따라 농도가 높아지는 경향이 나타났다. 연료량을 20, 24, 30 kg/hr로 차츰 증가 시킬 경우, bed와 freeboard의 온도는 상승하였으나, NO_x의 농도는 비례해서 증가하지 않았다. 일반적으로 알려진 연소로 NO_x의 생성과정은 고온에서 공기 중의 질소성분과 반응하여 발생하는 thermal NO_x이지만, 본 실험에서는 연소로 온도가 비교적 낮은 800~1,100°C로 운전하였기 때문에 큰 영향을 받지 않았다고 사료된다. 오히려 이온공기량의 증가로 인하여 과잉공기비가 감소하게 되어서 NO_x의 농도가 전반적으로 낮아지는 경향을 보였다.

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

안정적인 연소조건을 유지하면서, 먼지를 포함한 대표적인 가스상오염 물질의 농도를 측정하였으며 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 배출허용기준을 초과한 항목은 먼지가 유일하였으며, 143.6, 118.0 mg/Sm³으로 측정되었다. RDF 연소시 가장 우려되었던 HCl의 경우

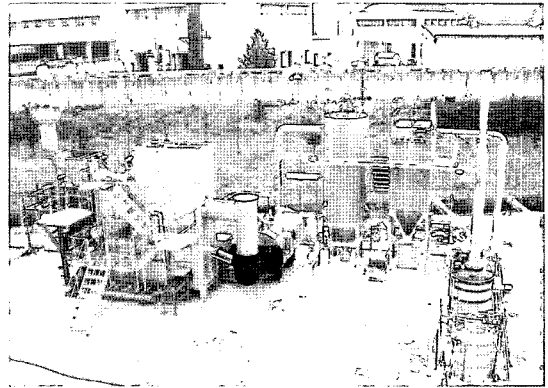


Fig. 6. 구동화격자식 연소시스템 전경.

Table 7. Properties of the RDF.

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

평균 36.44 ppm으로 나타나 기준치인 50 ppm에는 미치지 않는 것으로 조사되었다. 그러나 RDF는 플라스틱이 불균일하게 포함되어있기 때문에 산성가스에 대한 조사는 지속되어야 한다고 사료된다.

2.2.3. 구동화격자식 연소로에서 연소실험

가. 연소설비 구성 및 실험방법

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

100 kg/hr 화격자식 연소로에서 성형 RDF와 Fluff

Table 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
SO _x	300(12)	ppm	5.94	6.97	6.46
NO _x	200(12)	ppm	113.80	132.60	123.20
CO	600(12)	ppm	55.30	33.80	44.55

* : 산소농도 기준 (%), ** : Not detected.

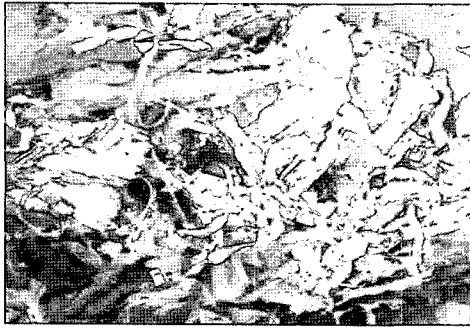


Fig. 7. Fluff RDF.

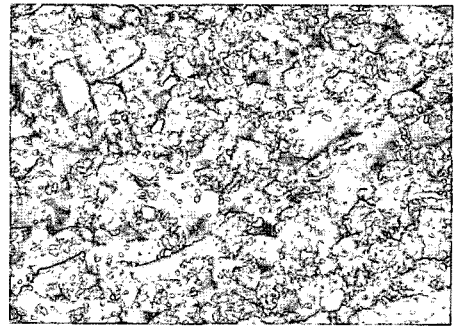


Fig. 8. Pellet RDF(15 mm.)

RDF을 연소하여 그 연소특성을 살펴보았다. 실험에 사용한 RDF의 물성치는 Table 7과 같다. Fig. 7과 같이 성형하지 않은 Fluff RDF와 이 Fluff RDF를 Fig. 8과 같이 pellet으로 성형한 RDF가 이 실험에서 사용되었다. 성형 RDF의 경우 수분함량이 19.2%로서, 운반 및 저장과정에서 수분이 다소 많이 포함되어 Fluff RDF보다 발열량이 약간 낮게 측정되었다.

실험방법은 먼저 1차 및 2차연소실 버너를 이용하여 노내의 온도를 시료가 충분히 연소될 수 도록 가열한 다음 1차버너의 가동을 중지시킨다. RDF를 5 kg씩 무게를

젠 다음 일정한 시간 간격(약 4분)을 두고 정량 투입한다. 2차 연소실 온도가 약 850°C 이상이 되고 연소실 온도가 일정하게 유지되었다고 판단되었을 때 배가스 분석기를 이용하여 배가스 농도를 측정하였다. 또한 실시간으로 1차 및 2차 연소실 온도데이터를 저장하였다.

나. 실험결과 및 고찰

① 온도분포

Fig. 9는 성형 RDF와 Fluff RDF를 연소시켰을 때 노내 온도분포를 각각 나타낸 것이다. Fluff RDF를 먼저 투입하였으며 그 다음 성형 RDF를 투입하였다. 보

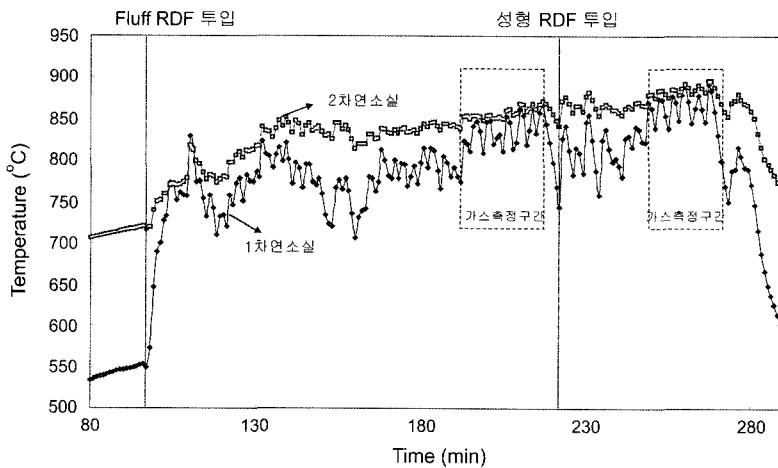


Fig. 9. RDF 연소시 노내 온도분포.

Table 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)

는 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 높은 밀도를 가진 성형 RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

② 연소가스 분석

Table 8은 정상상태에서 Fluff RDF와 성형 RDF의 배가스 농도를 나타낸 것이다. 폐기물이 투입된 직후 산소 농도가 점차 감소하였고 그 때 CO의 농도가 증가하였다. 온도분포와 마찬가지로 폐기물 투입과 함께 O₂와 CO의 농도도 하나의 사이클을 이루고 있었다. 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 12 ppm, 21 ppm으로 소석회 등의 제거시설 없이 낮은 값을 나타내었다. 대체적으로 Fluff RDF와 성형 RDF 모두 원활한 연소가 이루어졌다.

2.2.5. 회분식 연소로에서 연소실험

가. 연소설비 구성 및 실험방법

본 연소설비는 50 kg/hr의 설계용량을 가진 회분식 연소로로서 Fig. 10, Fig. 11과 같다. 주요 장치구성은 1차 및 2차 연소실, F/D 팬, 2차연소실 승온버너, 제어반 등으로 구성되어 있다.

나. 시료 및 실험방법

50 kg/hr 회분식 연소로에서 성형 RDF와 Fluff RDF

Table 9. Properties of RDF

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

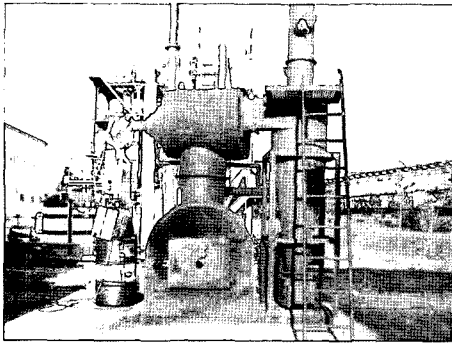


Fig. 10. 회분식 연소로 전경



Fig. 12. 미성형 RDF



Fig. 11. 1차연소실 내부



Fig. 13. 미성형 RDF를 1 kg씩 봉지에 담은 모습

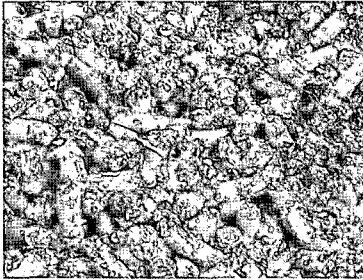


Fig. 14. 성형 RDF.

을 연소하여 그 연소특성을 살펴보았다. 실험에 사용한 RDF의 물성치는 Table 9와 같다. Fig. 12와 같이 성형하지 않은 Fluff RDF를 1kg씩 무게를 달아 Fig. 13과 같이 검은 봉지에 담아 투입이 쉽도록 하였다. Fig. 14와 같은 성형 RDF도 1kg씩 무게를 달아 투입하였다.

실험방법은 먼저 경유버너를 이용하여 2차 연소실 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°C 이상이 되고 연소실 온도가 일정하게 유지되었다고 판단되었을 때 배가스 분석기를 이용하여 배가스 농도를 측정하였다. 또한 실시간으로 2차 연소실 온도데이터를 저

장하였다.

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.

나. 실험결과 및 고찰

① 온도분포

Fig. 15는 성형 RDF와 Fluff RDF를 연소시켰을 때 2차 연소실 온도분포를 나타낸 것이다. Fluff RDF를 먼저 투입하였으며 그 다음 성형 RDF를 투입하였다. Fluff RDF의 경우 투입량은 60 kg/hr였으며 성형 RDF는 51 kg/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 연소소에서 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°C로 Fluff RDF의

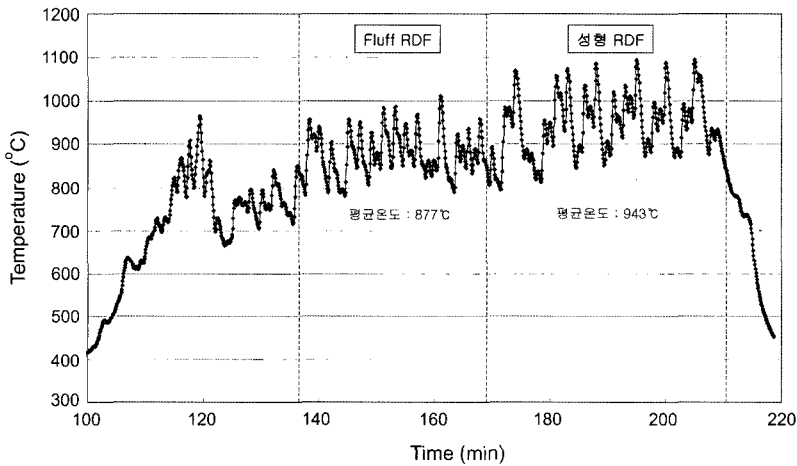


Fig. 15. 2차연소실 온도분포도

Table 10. RDF 종류에 따른 배가스 농도

RDF 종류 \ 배가스 농도	O ₂ (%)	CO(ppm)	NO(ppm)	SO ₂ (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)

877°C보다 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. 성형 RDF의 경우 저위발열량이 4,046 kcal/kg으로 Fluff RDF의 3,220 kcal/kg보다 다소 높지만 투입량이 각각 51 kg/hr으로 Fluff RDF의 60 kg/hr보다 적다. 즉 시료의 총 투입된 열량은 거의 비슷하지만 성형 RDF의 평균온도는 훨씬 높다는 것이다. 이러한 특성은 앞의 실험에서와 같은 결과로서 높은 밀도를 가진 성형 RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

② 연소가스 분석

Table 10은 정상상태에서 Fluff RDF와 성형 RDF의 배가스 농도를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 폐기물이 투입 직전에 측정된 값이며 교반이 이루어질 때는 CO 농도가 매우 높기 때문에 측정에서 제외하였다. Table 10에서 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.

3. 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 얻을 수 있도록 연구를 수행할 계획이다.

- 기포유동층 연소로에서는 투입량을 5 kg/hr으로 하였을 때 가스공탐속도 1.2 m/s, 2차연소용공기 300~400 l/min.으로 운전할 때 연소온도가 900°C 부근에서 안정적인 연소가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.
- 순환유동층 연소로의 경우 당초 설계시 고려하였던 투입용량이 50 kg/hr였으나 정량을 투입할 경우 free board부 온도가 1,000°C 이상으로 과열되는 현상이 발생하여 정량투입을 할 수 없었으며 실험 결과 24 kg/hr을 투입하면서 가스공탐속도 5.1~6.7 m/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 36.4 ppm으로 배출허용기준치보다는 낮으나 저감대책이 필요한 것으로 판단되었다.

- 연속연소식 연소로의 경우 성형 RDF와 fluff RDF를 비교 실험한 결과 1, 2차 연소실의 온도가 성형RDF 쪽이 더 높다는 것을 알 수 있었으며 이처럼 높은 밀도를 가진 성형 RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리한 것을 알 수 있었으며 배가스 특성은 비슷한 값을 나타내었다.
- 회분식 연소로에서의 성형 RDF와 fluff RDF 비교 실험 결과 총 투입된 열량은 거의 비슷하지만 성형 RDF의 평균온도가 훨씬 높게 나타나 앞의 실험 결과와 같이 높은 밀도를 가진 성형 RDF의 연소가 안정적인 열회수 측면에서 더 유리한 것을 알 수 있었으며 배가스 특성은 비슷한 값을 나타내었다.

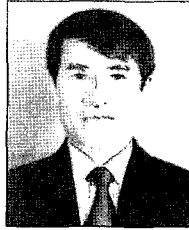
사 사

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

참고문헌

1. 노남선 외, 2002: “폐기물 고품연료(RDF)의 고효율 연소보일러 개발”, 한국에너지기술연구원, 최종보고서, 170 pp.
2. 노남선 외, 2003: “RDF 연소설비의 표준화/규격화 방안 구축 연구”, 한국에너지기술연구원, 중간보고서, 53 pp..
3. 윤균덕 외, 2003: “환경성을 고려한 RDF 품질표준화 연구”, 산업기술시험원, 최종보고서, 457 pp..
4. 김우현 외, 2002: “폐기물 고품연료(RDF)의 유동층 연소기술 개발”, 한국기계연구원 최종보고서.
5. 최연석 외, 1999: “도시 폐기물의 고품 연료화 장치 개발”, 한국기계연구원 중간보고서.
6. 최연석, 권영배, 1998: 폐기물 고품연료(RDF)의 특성 및 전망”, 한국폐기물학회지, 15(4), pp. 287-299.
7. 최경빈 외, 1998: “폐기물의 에너지화 기술개발 연구(II) - 중소도시용 중소형 청정 소각장치 개발(II)”, 한국에너지기술연구소 연구보고서, pp. 155-.
8. 전홍석 외, 1996: “대체에너지 기술개발 기본계획 개선연구-폐기물에너지”, 한국에너지기술연구소 연구보고서 (951Z101103FG1), pp. 337-348.
9. 김승도 외, 1997: “소형 소각시설의 문제점 및 개선방안

- 에 대한 연구”, 한국폐기물학회지, 14(8), pp. 921-932.
10. 김우현 외, 1997: “특집-소형 소각로”, 일간폐기물 5월호, pp. 70-113.
 11. 환경부, 2003: “폐플라스틱 고형연료 제품의 품질기준 · 사용처 등에 관한 기준”, 환경부 고시 제 2003-127호.



金 宇 顯

- 동아대 환경공학과(학사)
- 부경대 환경공학과(박사)
- 현재 한국기계연구원 환경에너지기계 연구본부 책임연구원

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解説	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解説, Review
技 術 報 告	實際의인 試驗, 調查의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解説하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外的 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 階霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 掲載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.