

음식물쓰레기로 부터 제조한 분체연료 연소특성

손현석*, 박영성, 김상국**

A Study on Combustion Characteristics of Pulverized Fuel Made from Food Waste

Hyunsuk Son*, Yungsung Park and Sangguk Kim**

Abstract

Three properties of food waste are water 80%, ash 3%, volatile matter 17%. When food waste goes through treatment process such as removal of foreign substances, removal of water as well as sodium, dryness, and pulverization, it transforms into 4,000 Kcal/kg pulverized fuel if moisture content is below 13%. Fuel ratio (fixed carbon/volatile matter) of pulverized fuel is low compared with bituminous coal. Ignition temperature measured by thermogravimetry analyzer is about 460°C. Combustion test of pulverized fuel have been performed using energy recovery facility which include storage tank of dewatered cake, dryer, hammer mill, combustor including burner, boiler, flue gas treatment equipment. When 160-180 kg/hr of fuel is steadily supplied to burner for 3 hours, combustor temperature reaches about 1000°C and CO is 77-103 ppm at 1.55 excess air ratio and SOx and Cl are under 2 ppm and 1ppm, respectively. This experiment demonstrate that pulverized fuel made from food waste could be an alternative clean energy at the age of high oil price.

Key words

Food waste(음식물쓰레기), Purverized fuel(고형분체연료), Burner(버너), Heating value(발열량), Volatile matter(휘발성 물질)

(접수일 2008. 11. 6, 수정일 2008. 11. 25, 게재확정일 2008. 12. 1)

* 대전대학교

■ E-mail : blue6282@hanmail.net ■ Tel : (042)860-3659 ■ Fax : (042)860-3134

** 한국에너지기술연구원

■ E-mail : sgkim@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3632 ■ Fax : (042)860-3134

1. 서론

국내 생활쓰레기의 약 23%를 차지하고 있는 음식물쓰레기의 양은 2001년 기준으로 하루 평균 11,237톤이 배출되고 있다.⁽¹⁾ 음식물쓰레기를 주로 배출하는 곳은 일반가정이 70%, 음식점과 농수산물유통시장등이 30%를 차지하고 있다. 배출

되는 음식물쓰레기의 53.1%는 수분의 함량이 높은 채소류이고 그다음은 육류와 어패류 순이다.⁽²⁾ 현재 음식물쓰레기 처리방안으로는 매립과 소각, 재활용등이 있는데 2차적인 환경문제를 야기하는 매립과 소각은 점차 줄어드는 추세인 반면 음식물쓰레기의 재활용은 그 중요성이 커져가고 있다. 재활용방법은 퇴비 및 사료 그리고 연료화이다. 퇴비는 염분을 포

함한 품질관리, 사료는 에너지비용의 증가로 인하여 보급에 어려움을 겪고있다. 음식물쓰레기는 중금속등에 의하여 오염되지 않고 가연성성분 중 휘발분 비율이 높아 착화 및 연소가 잘되어 청정연료로 전환할 수 있다.

본 연구에서는 음식물쓰레기를 신,재생에너지원료로 활용하고자 음식물쓰레기로부터 이물질제거, 탈수 및 염분제거, 건조, 파쇄공정을 거쳐 분체연료를 제조하고 분체연료의 발열량, 원소 및 공업분석, 열중량분석등 연료로서의 특성을 조사하였다. 또한 에너지회수설비에 적용하기 위하여 분체연료를 버너에서 연소특성과 이에 수반되는 연소효율, 온도분포, 배가스조성, 회재특성등을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 음식물쓰레기를 이용한 분체연료 제조와 분체연료의 연소특성을 조사하기 위하여 음식물쓰레기로부터 이물질제거, 탈수 및 염분제거, 건조(함수율 약 35%)가 된 중간처리물을 반입하여 분체연료제조, 200[Kg/hr]급 연소설비, 열회수설비, 배가스 처리설비가 갖추어진 pilot scale 에너지회수설비를 이용하여 실험하였다.

2.1 분체연료 제조

음식물쓰레기의 삼성분은 계절 및 지역에 따라 다소 차이가 있으며 약 수분 80%, 회분 3%, 휘발분 17%이다.⁽³⁾ 분체연

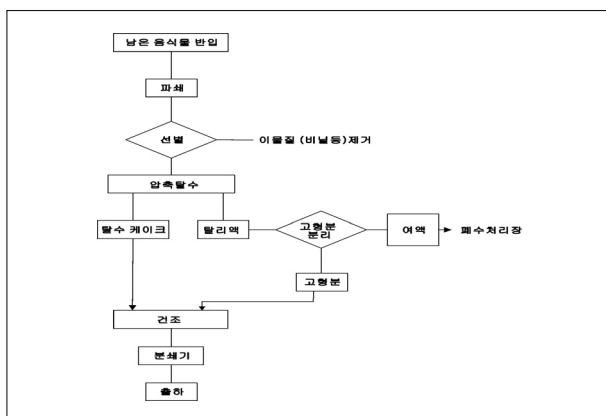


Fig. 1 Flow diagram for the preparation of the pulverized fuel.

료는 수도권지역에서 수거한 음식물쓰레기를 원료로 하였다. 분체연료 제조공정은 음식물쓰레기로부터 비닐등 이물질을 제거하고 압축탈수과정에서 탈수와 동시에 상당량의 염분이 제거되며 탈리액 중 고형분은 데칸타를 이용하여 분리한 다음 탈수케이크와 함께 건조기에서 함수율 13%이하로 건조한다. 마지막으로 파쇄 과정을 거쳐 평균입경이 약 30mesh로 분체연료를 제조한다. Fig. 1은 분체연료의 제조공정을 나타낸 공정도이다.

2.2 분체연료 분석

음식물쓰레기 처리시(특히 사료) 처리비용중 가장 많은 비중을 차지하는 것은 건조시 요구되는 에너지비용이다. 음식물쓰레기 처리장에서 중간처리물 및 최종처리물을 수거하여 건조특성을 조사하였다. 13개의 시료를 105℃로 유지되는 건조기에 넣고 매 20분 간격으로 꺼내어 수분측정기(AND MX50)를 사용하여 함수율을 측정하였다. Fig. 2는 중간처리물의 건조특성을 나타내는 그래프이며 Fig. 3은 최종처리물의 건조특성이다.

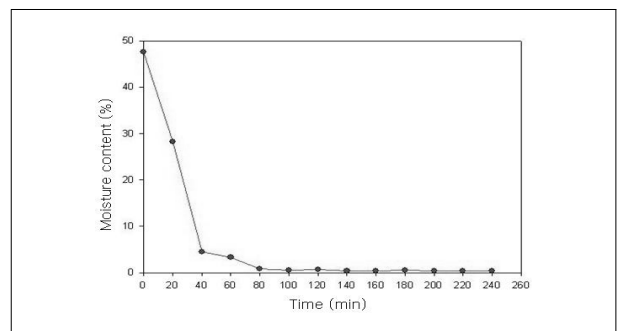


Fig. 2 Dry characteristics of the intermediate product.

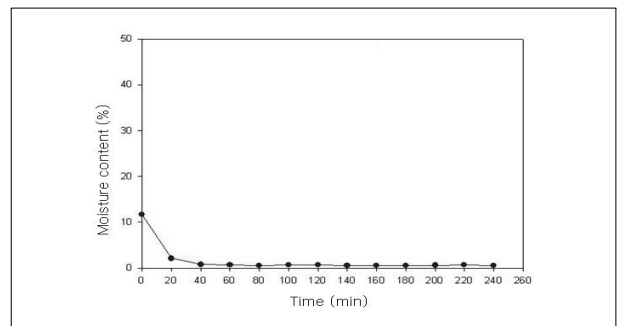


Fig. 3 Dry characteristics of the final product.

Table 1. Elementary analysis of the pulverized fuel

성분 시료	탄소	수소	질소	산소	유황분
시료 1	46.4	5.64	3.06	30.77	0.15
시료 2	45.9	6.49	2.97	33.19	0.25
시료 3	47.8	6.91	2.48	30.86	0.22

Table 2. Proximate analysis and heating value of the pulverized fuel

성분 시료	수분	휘발분	회분	고정탄소	발열량 (Kcal/kg)
시료 1	6.24	69.17	13.44	11.15	3,960
시료 2	10.73	68.72	11.2	9.35	4,010
시료 3	11.26	65.72	11.73	11.29	4,340

음식물쓰레기는 시간에 따라 함수율이 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었으며 함수율 47.62%인 시료가 함수율 4.43%로 감소하는데 40분의 시간이 소요되었다.

음식물쓰레기로 제조한 분체연료의 원소분석 결과는 Table 1에 나타내었으며 건조시료기준이다. 분석에 사용한 기기는 TruSpec CHN Elemental Analyzer(LECO)와 SC-432DR Sulfur Analyzer(LECO)이다.

제조한 분체연료의 공업분석 및 발열량 데이터는 Table 2와 같으며 도착시료기준이다. 발열량은 저위발열량이며 시료 3의 경우만 고위발열량이다. 대표적인 고형연료인 석탄의 경우 연료비(고정탄소/휘발분)가 석탄화정도를 나타내는 지수이며 무연탄의 경우 탄화도가 제일 높아 연료비가 12이상이며 유연탄은 4-7이다. 분체연료는 연료비가 0.14-0.17로 휘발분이 상대적으로 훨씬 많아 착화가 잘되고 연소 후 생성되는 촉(탄소+회분)의 양이 작아 상대적으로 연소로내 요구되는 가스체류시간이 적다.

사용한 분석기기는 TGA-701 Thermogravimeter와 Parr 6320EF Calolimeter이다. 저위발열량은 약 4,000[Kcal/kg]으로 여러 가지 물질이 혼합되지 않은 단일성분이며 연소시 에너지회수시설에서 요구하는 3,000[Kcal/kg]을 만족하였다.

분체연료 연소시 중요한 물성 중 하나는 휘발 및 착화온도이다. 이를 위하여 분체연료의 열중량분석을 하였다. 질소분위기하에서 승온속도를 10°C/min로 유지하면서 실험한 TGA 그래프는 Fig. 4와 같으며, 승온속도 10°C/min인 조건에서 carrier gas를 공기로 하여 실험한 TGA 그래프는 Fig. 5와 같다. 아래 그림으로부터 분체연료의 휘발온도는 200-400°C

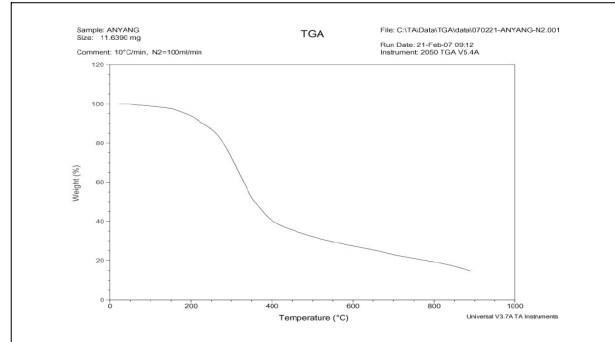


Fig. 4 Experimental TG curve (nitrogen).

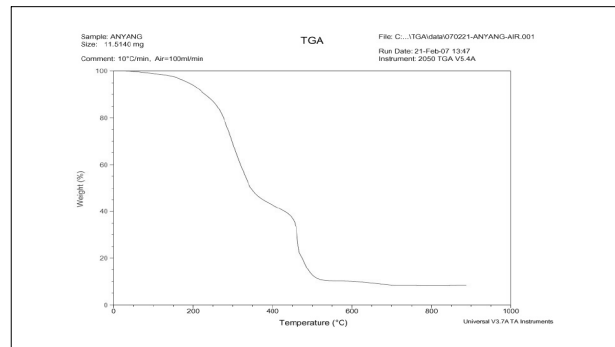


Fig. 5 Experimental TG curve (air).

온도구간이며 착화온도는 약 460°C인 것을 알수있다.

2.3 Pilot scale 에너지회수설비

Pilot scale 실험장치인 에너지회수설비는 full 부하시 분체 연료를 200kg/hr 연소하여 보일러에서 5Kgf/cm² 스팀을 1 톤/시간 발생할 수 있는 규모로 설계, 제작하였다. 공정도는 Fig. 6과 같다. 함수율이 약 35%인 음식물쓰레기 중간처리물을 반입하여 저장 yard에 저장하고 보일러에서 공급되는 스팀을 이용하여 건조기에서 함수율 13%이하로 건조한 다음 hammer mill을 사용하여 평균입경 30mesh로 분쇄하여 분체연료를 제조하였다. 분체연료용 버너는 주로 미분탄 연소 목적으로 개발되어왔다.⁽⁴⁾ 본 연구에서 분체연료는 정량피더에서 일정량 버너로 공급되며 1차공기가 분체연료를 분산시켜 연소로에 공급한다. 2차공기는 회전하면서 화염길이를 짧게 하는 동시에 화염형태를 구성하며 3차공기는 windbox를 통하여 공급된다. 연소로에서 뜨거운 연소배가스를 보일러에 공급하여 스팀을 발생시켜 건조기 열원으로 사용하였다. 분

체연료에 포함되어있는 염분의 용융온도는 약 800℃이다. 보일러 입구온도를 염분의 용융온도 이하로하여 보일러에서의 fouling을 최소화하기 위하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 외부공기를 열교환기에서 연소배가스와 열교환시킨 후 보일러 전단에 공급하여 보일러 입구온도를 750℃로 낮추도록 설계하였다. 보일러를 지난 연소배가스는 백필터에서 분진을 제거하고 열교환기에서 연소배가스와 열교환하여 1차, 2차, 3차 연소용공기를 가열하며 I.D.Fan을 거쳐 스택에서 외부로

배출한다. 보조장치는 스크류 이송장치, 회재배출장치, 공기 압축기 및 cooler, 전기제어반, 각종 유량계 및 온도센서, Fan, 가스분석기, 보일러 급수 시스템이다. Fig. 7에 각종센서의 배치를 나타내었다. 운전은 LPG를 이용하여 예열한 후 연소로 온도가 600℃를 넘으면 분체연료를 공급하고 800℃를 초과하면 LPG를 잠그고 분체연료만 연소하면서 장치를 운전하였다.

Fig. 8은 반입한 음식물쓰레기 중간처리물 저장시설이며 Fig. 9는 정량 feeder 및 버너 사진이다.

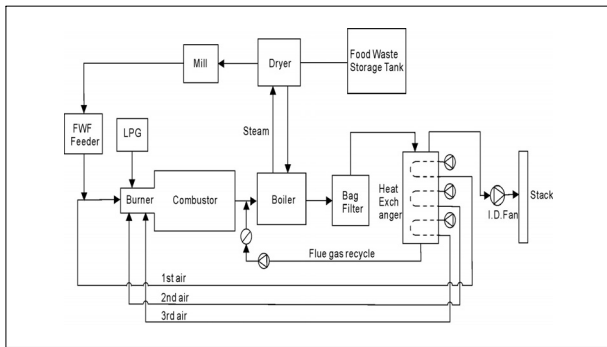


Fig. 6 Flow sheet of the energy recovery facility.

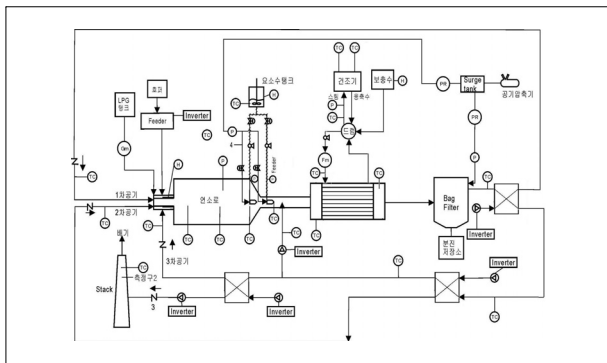


Fig. 7 Arrangement plan of the sensors of the energy recovery facility.



Fig. 8 Stock yard for the intermediate product of the food waste.



Fig. 9 Burner and metering feeder.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소 실험

전술한바와 같이 LPG를 사용하여 예열한 후 분체연료를 연소하면서 pilot scale 실험설비에서 연속적으로 측정된 온도의 분포는 Fig. 10과 같다.

상부 곡선군은 연소로내 온도이며 약 1,000℃를 나타내고 있고 하부 1개의 온도는 연소로와 보일러사이 덕트 벽체 온도이다. 연소로내 온도분포별 배가스분석 결과는 Table 3과 같다. 초기에는 연소로 온도가 낮기 때문에 과잉공기비를 높게 유지하였지만 온도가 상승하여 연소가 안정됨에 따라 점차 과잉공기비를 감소하였다. 연소로 온도가 증가함에 따라 산소 12% 농도로 보정한 CO 농도가 감소하여 완전연소에 접근하는 경향을 나타내었다. 연소로온도가 984-1050℃, 연료공급량 180kg/hr일때 산소농도가 8.1%, CO₂가 11.92%이었으

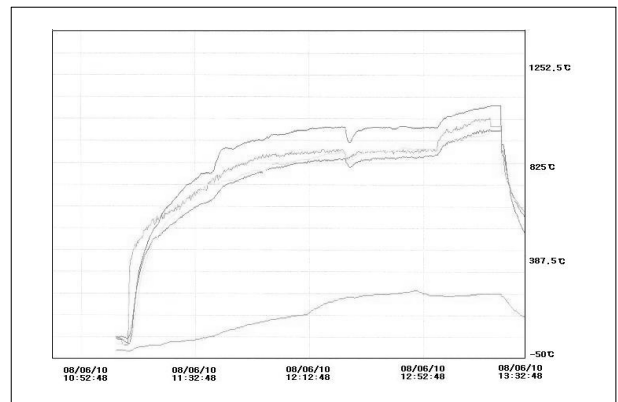


Fig. 10 Temperature profiles in the combustor.

며 이때 과잉공기비가 1.56이었고 산소 12%로 환산한 CO는 72ppm, NOx는 64ppm이었다. 배가스분석장치는 Green Line 9000을 사용하였다. 대기오염공정시험방법 제3장 제2절 제5항 티오시안산제이수은법으로 측정된 HCl농도는 0.02ppm이었다. Table 4에 대기오염물질 배출허용기준을 나타내었다.⁽⁵⁾ 연소실험 배가스의 산소 12%로 환산한 CO 및 NOx농도,

Table 3. Flue gas concentration depending on the combustion temperatures

로내온도 ℃	O ₂	CO ₂	CO	NOx	SO ₂	산소 12%		과잉 공기비	투입량 [kg/hr]
	%	%	ppm	ppm	ppm	CO	NOx		
668-698	15.5	5.2	91	64	0	151	105	3.56	160
777-856	8.8	11.26	178	129	0	131	95	1.84	170
921-1000	7.8	12.26	217	90	0	148	61	1.53	180
985-1059	8.0	12.0	77	89	0	53	61	1.55	180
984-1050	8.1	11.92	103	91	2	72	64	1.56	180

Table 4. Incinerator emission standards and guidelines

대기오염 물질	배출시설(0.2-2.0톤/시간), ppm	
	소각시설	RDF
일산화탄소	200(12)이하	200(12)이하
염화수소	40(12)이하	20(12)이하
염소	10이하	10이하
황산화물	70(12)이하	50(12)이하
질소산화물	150(12)이하	100(12)이하

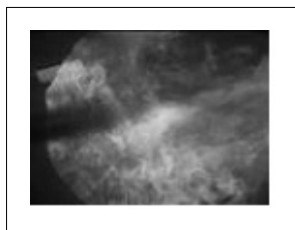


Fig. 11 Burner flame.

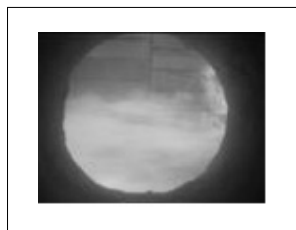


Fig. 12 Flame at the front of the combustor.



Fig. 13 Flame at the middle of the combustor.

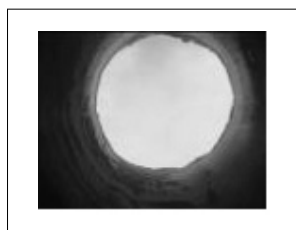


Fig. 14 Flame at the rear of the combustor.

SO₂농도, HCl농도는 가스상물질 배출허용기준(12% O₂ 기준)인 200ppm, 150ppm 또는 100ppm(RDF), 70ppm 또는 50ppm (RDF), 40ppm 또는 20ppm(RDF)을 만족하였다.

버너연소사진은 Fig. 11~14와 같다. Fig. 11은 버너에서 분출되는 화염을 측면에서 촬영한 사진으로 분체연료가 버너에서 분출되어 화염이 형성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 연소실의 앞면부 즉 버너에 가까운 지점에서 연소로 측면에 마련된 투시구를 통하여 촬영한 화염사진이다. 버너에서 분출된 화염이 빠르게 지나가는 것을 볼 수 있다. Fig. 13은 연소실 중간부에 마련된 투시구를 통하여 촬영한 사진으로 화염의 끝부분에 해당되며 Fig. 14는 연소실 뒷부분 즉 배가스배출지점과 가까운 위치에서 촬영한 사진으로 화염이 미치지 않는 화염에 의하여 밝은 빛이 형성되는 것을 볼 수 있다.

3.2 분석 및 고찰

연소 후 연소효율을 측정하고 회재상태를 분석하기 위하여 연소로 하부에서 바닥재를 채취하고 백필터에서 비산재를 채취하여 공업분석 및 화학분석을 하였으며 결과는 Table 5와 같다. 공업분석은 도착시료 기준이며 원소 및 황분석은 건조시료 기준이다. 분석결과 회분이 비산재에서 96.48%, 바닥재에서 90.91%로 분체연료가 거의 연소되었음을 나타내었으며 바닥재에서는 휘발분의 비율이 다소 높았고 중금속성분은 거의 검출되지 않았다.

Table 6은 다른 연소실험에서 채취한 회재에 대한 공업분

Table 5. Composition of the ash (1)

항목	공업분석(wt%)				화학분석			
	수분	휘발분	재	고정탄소	Pb, ppm	As, ppm	Na (%)	Cl (%)
비산재	0.79	2.69	96.48	0.04	9.16	N,D	2.1	3.1
바닥재	0.33	8.67	90.91	0.09	N,D	N,D	1.1	1.6

Table 6. Composition of the ash (2)

항목	공업분석(wt%)				원소분석(wt%)			
	수분	휘발분	재	고정탄소	C	H	S	O
비산재	0.47	2.79	91.18	5.62	0.36	0.33	N,D	7.97
바닥재	0.12	7.98	91.81	0.10	1.35	0.20	N,D	6.28

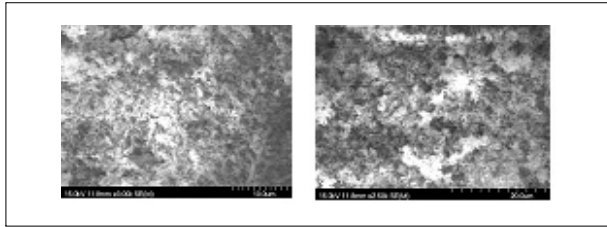


Fig. 15 SEM picture of the fly ash (3.0K, 2.5K).

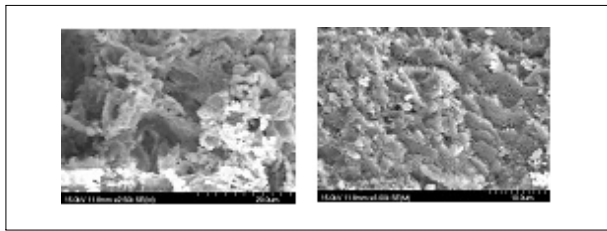


Fig. 16 SEM picture of the bottom ash (2.5K, 3.0K).

석 및 원소분석결과를 나타내었다. 공업분석결과는 Table 5와 비슷한 결과를 나타내었으며 원소분석에서 소량의 카본 및 수소가 검출되었지만 유황분은 검출되지 않았다.

고형연료의 연소효율은 주입된 연료와 배출되는 회재 및 연소가스 중에 함유된 미연소분 사이 탄소량수지와 발열량수지를 기준으로 계산하는 방법이 있으며 본 연구에서는 발열량수지로 계산하였다.⁽⁶⁾ 배출가스 중 가연성가스량은 거의 존재하지 않으므로 무시하였으며 연소효율은 아래 식 (1)에 의하여 계산하였다.

$$\eta = 100 \times \left[1 - \frac{F_f \times H_f + F_b \times H_b}{F_0 \times H_0} \right] \quad (1)$$

여기에서 F_0 는 분체연료의 투입량[kg/hr], H_0 는 분체연료 발열량[Kcal/kg], F_f 는 비산재 발생량[kg/hr], H_f 는 비산재 발열량[Kcal/kg], F_b 는 바닥재 발생량[kg/hr], H_b 는 바닥재 발열량[Kcal/kg]이다. 분체연료 발열량은 측정에 의하여 구할 수 있지만 비산재나 바닥재는 발열량이 너무 낮아 측정이 불가능하다. 따라서 Table 6의 원소분석결과를 이용하여 Dulong식으로 계산하여 구하였다. 분체연료 중 회분은 Table 2에서 보는 바와 같이 11.2-13.44%로 비교적 낮았고 Table 6과 같이 회재 중 가연성성분 함량이 매우 낮아 분체연료가 거의 완전하게 연소되었을 나타내었으며 식 (1)에 의하여 계산한 연소효율은 99.4%이었다.

회재특성을 조사하기 위하여 채취한 비산재와 바닥재의 전

Table 7. Composition of the ash by the EDAX analysis

구분	원소(wt%)				
	Na	Cl	S	K	Ca
비산재	10,63	21,06	6,94	17,14	10,94
	14,59	25,46	8,66	21,77	3,10
	12,71	25,33	8,13	21,93	1,24
바닥재	2,30	0,99		0,62	34,05
	0,96	0,34	0,39	0,35	40,82
		0,45		0,37	38,19

자주사현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 사진을 비교하여 보았다. Fig. 15는 비산재의 SEM 사진이며 Fig. 16은 바닥재의 SEM 사진이다.

비산재는 로내 체류시간이 1-2초로 짧기 때문에 고온 분말 형태로 존재하지만 바닥재는 로내에 체류하여 고온 영향으로 대부분이 용융된 상태로 존재함을 알 수 있다. 회재조성을 비교하기 위하여 비산재와 바닥재의 구성성분을 전자현미경에 부착되어있는 EDAX(Energy Dispersive Spectrometer)를 사용하여 조사하여 보았으며 결과는 Table 7과 같다.

비산재의 경우 바닥재에 비하여 상대적으로 염분, 황 함량이 많고 바닥재는 칼슘 함량이 높았다. EDAX분석결과는 비산재에 염분함량이 상대적으로 높으므로 보일러에서의 fouling을 감소하기 위하여 보일러 입구 연소배가스 온도를 염분의 융점이하로 유지하는 것이 중요함을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 음식물쓰레기를 이용한 분체연료제조와 연료로서의 특성을 분석하였으며 연소장치를 이용하여 연소특성을 관찰하였다.

음식물쓰레기를 원료로 제조한 분체연료의 저위발열량은 함수율이 13%이하에서 약 4,000Kcal/kg이었으며 평균입도는 약 30mesh이었다. 분체연료는 연료비가 0.14-0.17로 휘발분이 많으며 열중량분석결과 착화온도가 460°C로 착화가 매우 용이하였다. 분체연료를 버너에서 연소실험한 결과 안정된 연소가 이루어졌으며 약 1,000°C 온도구간에서, 과잉공기비 1.55일때 CO는 77-103ppm, NOx는 89-91ppm, SOx 2ppm, HCl 0.02ppm으로 가스상물질 배출허용기준치를 만족하였다. 연소효율은 99.4%로 거의 대부분의 가연성물질이

연소되었다. 음식물쓰레기 제조과정인 압축탈수과정에서 상당량의 염분이 제거되지만 분체연료에 잔류한 염분에 의한 파울링을 방지하기 위하여 보일러 입구온도를 염분의 융점이 하로 낮춘결과 파울링저감에 매우 효과적이었다.

본 실험결과 음식물쓰레기를 원료로 제조한 분체연료는 고유가 시대에 새로운 청정에너지로 사용될 수 있음을 보여주었다.

후 기

본 연구는 신.재생에너지센터에서 지원하는 신.재생에너지기술개발사업으로 수행되었으며, 이에 심심한 감사를 드립니다.

References

- [1] 박규만, 정영현, 노경환, 김택준, 오광중, 2004, "Char의 혼합에 의한 음식물쓰레기의 연료화에 관한 연구", 대한환경공학회 2004 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 920-922, 경성대학교.
- [2] 권호정, 2004, "음식물쓰레기의 효율적 관리를 위한 물리적 특성및 처리", pp. 46-49, 부산대학교 환경대학원 석사학위논문.
- [3] 배재근, 2001, "음식물쓰레기의 자원화와 자원순환체제의 구축", 지역폐기물의 효과적인 처리를 위한 심포지움, pp. 85-104, 한밭대학교.
- [4] 김상현, 권혁제, 김혁필, 송시홍, 이익형, 2004, "산업용 보일러에 적용된 저 NOx 미분탄버너의 연소특성 평가", pp. 1751-1755, 대한기계학회 추계학술대회 논문집.
- [5] 환경부, 2001, "대기환경보전법 시행규칙", 대기환경보전법률 제5388호.
- [6] 이재근, 1990, "고형폐기물의 유동층 연소특성", 한국과학재단 연구보고서 과제번호 871-1004-011-2, p. 9, 국립수산대학.

손 현 석



2007년 대전대학교 공학사

현재 대전대학교 환경공학과 석사재학
(E-mail : blue6282@hanmail.net)

박 영 성



1978년 서울대학교 화학공학과 공학사
1983년 충남대학교 화학공학과 공학석사
1989년 충남대학교 화학공학과 공학박사

현재 대전대학교 환경공학과 교수
(E-mail : yspark@dju.kr)

김 상 국



1978년 한양대학교 화학공학과 학사
1982년 Tennessee Technological University
화학공학과 석사
1988년 North Carolina State University
화학공학과 박사

현재 한국에너지기술연구원 책임연구원
(E-mail : sgkim@kier.re.kr)