

고형연료제품 성상 변화에 따른 연소특성에 관한 연구

임종완 · 동종인[†] · 윤균덕* · 심재용**

서울시립대학교 환경공학부, *한국산업기술시험원, **태종NEC
(2015년 9월 4일 접수, 2015년 9월 16일 심사, 2015년 10월 19일 채택)

A Study on Combustion Characteristics due to Changes in Solid Refuse Fuel Properties

Jong-Wan Lim, Jong-In Dong[†], Kyoong-Duck Yoon*, and Jae-Young Shim**

School of Environmental Engineering, University of Seoul, 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, 02504, Korea

*Korea Testing Laboratory, 10, Chungui-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, 52852, Korea

**Tae Jong NEC, 1 Gasan Digital-ro, Geumcheon-gu, Seoul, 08589, Korea

(Received September 4, 2015; Revised September 16, 2015; Accepted October 19, 2015)

초 록

본 연구에서는 SRF 성상 변화(RDF, RPF)와 성형 조건 형태(pellet, fluff)에 따른 SRF의 활용을 위한 기초연구로서 SRF의 물리화학적 특성, 연소시간에 따른 고형연료제품의 열적 감량 변화 및 발생하는 배출 가스(NOx, CO, HCl 등) 특성 연구를 수행함으로써 에너지원으로서의 활용을 위한 실험을 진행하였다. 실험결과, RPF 시료가 RDF 시료보다 폐기물의 조성이 플라스틱계열 폐기물로 균일한 성상으로 구성하고 있어 성형에 유리하고 발열량이 높으며, 연소성이 우수하여 연소감량효과도 크며 연소시간도 단축할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, fluff 시료가 pellet 시료에 비해 접촉 표면적이 넓어 연소시간도 단축되어 연소효율이 우수하며, 성형에 필요한 자원을 절감할 수 있어 에너지 활용가치가 우수할 것으로 판단된다.

Abstract

A basic research for utilizing solid refuse fuel (SRF) based on changing SRF properties (RDF, RPF) and types (pellet, fluff) is demonstrated. Physicochemical characteristics of SRF and also changes in thermal decomposition depending on combustion time and emission gas (NOx, CO, HCl, etc) concentration were investigated for applications to waste energy sources. In conclusion, RPF is easy to pelletize, and has better combustion efficiency, higher LHV, higher thermal reduction, and short combustion time because it is composed of plastic wastes homogeneously. Also, fluff type samples have better combustion efficiency, and short combustion time because it has wider exposed surface area for combustion. It can also save energy consumption for pelletizing.

Keywords: Solid Refuse Fuel, RDF, RPF, Combustion, Renewable energy

1. 서 론

화석연료의 고갈 및 온실가스 저감 계획에 따른 신재생에너지 자원의 확보는 전 세계적으로 가장 중요한 관심사의 하나가 되고 있으며 이에 따라 우리나라 또한 태양에너지 · 바이오매스에너지 · 풍력에너지 및 폐기물 에너지 등 대체에너지 개발에 많은 연구 및 사업화가 진행 중에 있다. 우리나라의 대체에너지 보급비율은 2009년 2.5%이며 그중에서 약 75%를 폐기물 에너지가 차지하고 있어 여러 가지의 대체에너지원 중에서 폐기물 에너지가 차지하는 비중은 절대적인 것으로 나타나고 있다. 최근 국내에서는 폐기물이 가지고 있는 열량적인 가치를 에너지 생산에 이용하는 “폐자원 에너지화 사업”에 대한 국가

적 차원에서의 필요성이 강조되고 있으며, 이에 대한 사업이 활발히 진행되고 있다.

폐기물 에너지화 기술의 경우 현재 폐기물 고형연료화(solid recovered fuel, SRF) 기술 및 열분해 유화를 통한 액상 연료유 회수기술 그리고 가스화를 통한 합성가스 회수 기술 등으로 나뉘어 연구개발이 진행되고 있으나 열분해 유화의 경우 아직 기술적 신뢰성의 문제로 연구단계에 머무르고 있으며 가스화의 경우 실증화 연구가 진행되고 있다[1-6]. 따라서 현재 소각 이외에 폐기물 에너지화 기술 중 상용화가 진행 중인 기술은 고형연료화 기술이다. 이와 관련하여 현재 『자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률』에서는 고형연료제품을 생활계폐기물을 이용한 RDF, 페비닐 및 플라스틱을 이용한 RPF, 폐타이어를 이용한 TDF와 폐목재를 활용한 WCP 등 4가지 형태로 구분하여 사용하도록 규정하고 있었으나, 고형연료제품의 사용의 활성화를 위해 최근 법개정을 통해 일반 SRF, BIO-SRF로 구분하여 사용하도록 규정하고 있다[7]. 현재 국내 · 외에서는 활발한 정책 추진에 따라 고형연료 제품으로 활용이 가능한 대상 폐기물의 종류 확대 사용 및 보급 등의

[†] Corresponding Author: University of Seoul,
School of Environmental Engineering, 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu,
02504, Korea
Tel: +82-2-6490-2862 e-mail: jidong@uos.ac.kr

Table 1. Characteristic of RDF and RPF Samples

items	class	shape
A	A-1 A-2	RDF
B	B-1 B-2	
C	C-1 C-2	RPF
D	D-1 D-2	

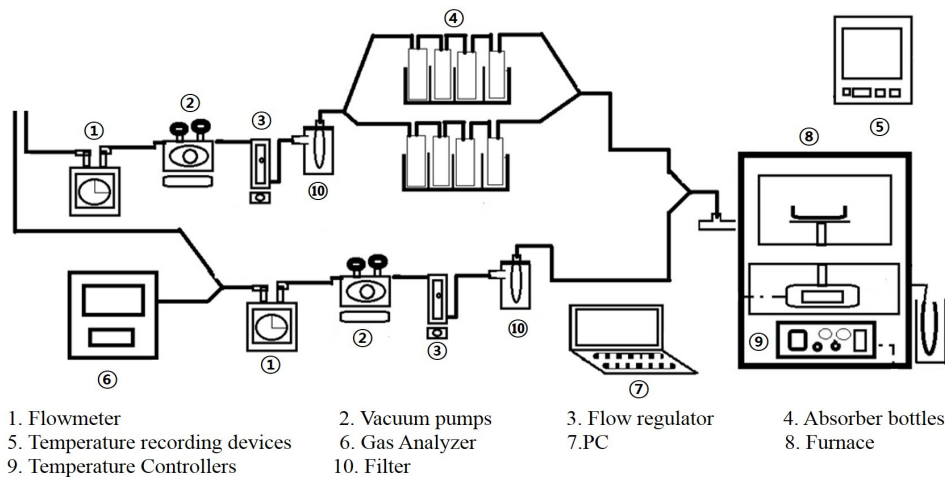


Figure 1. Schematic diagram of combustion test.

필요성이 중요하게 인식되고 있다. 이에 따라 그 수요가 증가할 전망이다. 이러한 세계적인 흐름에 맞추어 국내에는 에너지원으로 활용이 가능할 것으로 보이는 사업장 일반폐기물, 하수슬러지 및 palm 껍질 등의 다양한 폐기물을 이용한 고형연료제품 생산 및 활용 등에 대한 관심이 증가하고 있다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 폐기물 고형연료제품인 RDF, RPF를 성형 조건(완전성형, fluff)에 따른 고형연료의 활용을 위한 기초연구로서 고형연료제품의 물리화학적 특성, 연소시간에 따른 투입된 고형연료제품의 실시간 무게 변화 및 발생하는 배가스(NO_x , CO, HCl 등) 배출특성에 대한 특성연구를 수행함으로써 에너지원으로서의 활용을 위한 고찰이 이루어졌다.

2. 실험

본 연구에서는 성형된 고형연료제품과 비성형 고형연료제품의 물리·화학적 특성 및 연소 특성을 분석하기 위하여 고형연료제품 제조 시설에서 제조되는 제품을 사용하여, 분석을 실시하였다.

2.1. 실험재료

고형연료제품은 대표적으로 사용되는 RDF와 RPF 각각 2종을 사용하였으며, 각각 pellet 시료와 fluff 시료 두 가지로 나누어 시료를 선정하여 실험을 실시하였다. Table 1에는 본 연구에서 사용된 시료의 특성을 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 고형연료제품에 대한 물리·화학적 특성을 분석하였다. 분석 항목으로는 길이, 직경 및 진밀도, 삼성분(수분, 가연분, 회분), 원소분석(C, H, N, O, S 및 Cl) 및 발열량(고위발열량, 저위발열량) 등을 분석하였다. 또한 고형연료제품 연소특성 분석을 위해 연소시간에 따른 무게 감량 변화 및 대기오염물질 배출수준(O_2 , CO_2 , NO_x 및 HCl 총량)을 분석하였다. 고형연료제품 연소실험 장치는 연소로와 연소로 내부에 투입된 고형연료의 무게 변화를 실시간으로 측정하기 위한 저울을 설치하였다. 또한 연소로 내부의 온도 변화를 측정하기 위하여 온도센서를 설치한 후 온도기록 장치를 이용하여 실시간으로 연소로 내부 온도 변화를 측정하였다. 연소실험 장치 모식도를 Figure 1에 나타내었다.

2.2.1. 길이, 직경 및 진밀도

길이 및 직경은 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하였으며, fluff 형태의 시료는 측정할 수 없어 제외하였다. 진밀도는 시료의 길이 및 직경을 가지고 계산을 하였다. 길이 및 직경을 측정할 수 없는 fluff 형태의 시료는 진밀도 측정에서 제외하였다.

2.2.2. 삼성분 및 강열감량

삼성분은 수분, 가연분 및 회분을 의미하며, 고형연료제품의 삼성분 분석은 시료 중의 수분함량 및 가연분 함량 수준을 분석하여 고형연료제품의 품질 수준을 분석하기 위함이며, 강열감량은 고형연료제품

Table 2. Experimental Result of Length, Diameter and Density

items	pellet RDF		pellet RPF		
	B-1	B-2	D-1	D-2	
length (mm)	min.	31.07	41.15	51.06	32.23
	max.	61.03	63.7	92.26	75.60
	average	51.47	52.67	71.80	53.90
diameter (mm)	min.	18.25	18.21	14.92	15.00
	max.	19.39	22.55	35.24	37.03
	average	18.79	19.31	24.61	25.68
density (mg/m ³)	850.15	890.96	639.71	771.79	

의 연소 상태 수준을 파악하기 위해 분석하였다.

2.2.3. 원소분석

고형연료제품 중에 함유된 C, H, O, N 및 S 등의 함유량을 확인하기 위하여 원소분석을 실시하였다. 원소분석은 시료를 건조 후 파쇄기를 이용하여 미분쇄 파쇄 후 원소분석기를 이용하여 측정하였다. 측정된 결과값에 각 시료별 수분 함량을 보정을 하여 습기준 원소분석 결과를 나타내었다. 실험에 사용한 원소분석기는 FLASH EA 1112 Series 기기로서 C, H, N, S는 BBOT standard를 사용하였고, O는 L-aspartic acid standard를 사용하였다.

2.2.4. 발열량

발열량은 단위질량의 연료가 완전 연소했을 때 방출하는 열량으로 연소열이라고도 하며, 연료의 성능을 나타내는 중요한 기준이다. 연료의 고위발열량을 총발열량이라고도 하며, 이는 연료 중의 수분이나 수소의 연소에 의해 생성된 수분의 증발잠열을 포함한 열량이다. 그러나 실제 연소에서는 연소 배출가스 중의 수분이 과열 증기 상태로 배출되기 때문에 증발잠열은 고려하지 않는다. 용성이 없다. 그러므로 고위발열량에서 증발잠열을 제외한 열량을 유효열량으로 저위발열량 또는 진발열량이라고 한다. 본 연구에서는 고형연료제품 발열량은 1281 calorimeter를 사용하여 발열량을 측정 후 고형연료제품 시료의 수분함량을 보정하여 저위발열량을 계산하였다.

2.2.5. 고형연료제품 연소특성

연소실험 방법은 모든 연소대상 실험 시료의 무게를 50 g으로 일정하게 유지하였으며, 연소실험 시 공기 주입량은 25 L/min-Air (공기비 2.0). 전기로 내부에 시료를 투입 후 연소로 내부 온도는 등온으로 상승시켜 시료를 연소시킴으로써 발생하는 가스의 배출 성분 및 성상을 분석하였다. 연소 배출가스 분석은 Greenline 9000 (Eurotron, Italy)을 이용하여 연소가스 중의 먼지 등에 의한 영향과 시료채취 간의 온도 저하를 줄이기 위하여 시료 채취관 주변에 heating band를 감아 배출가스 온도를 120 °C 수준으로 유지하였으며, 시료 채취관을 거친 후 먼지필터를 이용하여 먼지를 제거한 후 배출가스 농도(O₂, CO, NO_x, SO_x)를 실시간 가스분석장치를 이용하여 측정하였다. 연소시간에 따른 투입된 고형연료 시료의 무게 감량변화(“열적감량변화”)를 분석하기 위해 연소로 하부에 저울을 설치하여 무게 감량변화를 실시간으로 분석하였다.

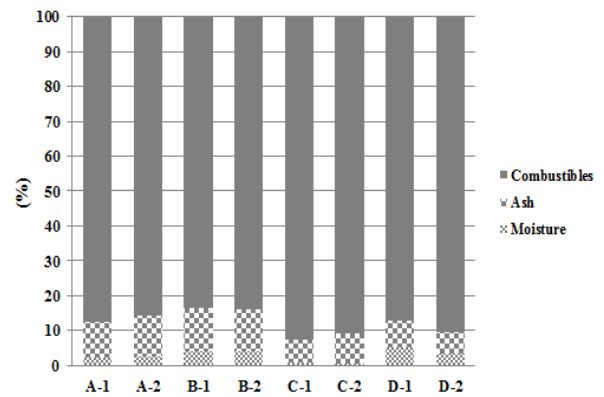


Figure 2. Experimental result of approximate analysis.

3. 결과 및 고찰

3.1. 물리화학적 특성

3.1.1. 길이 및 직경

본 실험에 사용된 고형연료제품의 길이 및 직경 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 시료의 특성상 fluff 형태의 A, C 시료는 길이 및 직경을 개별 측정하기에는 제약이 따라 육안검사를 실시하였다. pellet 시료인 RDF B-1, B-2 시료 평균 크기는 각각 길이 51.47 mm, 52.67 mm, 직경 18.79 mm, 19.31 mm로 측정되었다. RPF 시료는 시중에 유통되는 2종 시료로 하였으며 RPF D-1, D-2 시료 평균 크기는 각각 길이 71.80, 53.90 mm, 직경 24.61, 25.68 mm로 측정되었으며, RPF가 RDF보다 크기가 큰 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2. 진밀도

진밀도는 시료 한 개의 중량에 대하여 체적의 비를 말하는 것이다. 진밀도가 크다는 것은 성형밀도가 크다는 것을 의미하고 그만큼 고형연료제품이 단단하다는 것을 나타낸다. 분석 결과, RDF B-1, B-2 시료는 각각 850.15, 890.96 kg/cm³로 평균 870.56 kg/cm³로 분석되었으며, RPF D-1, D-2 시료는 각각 639.71, 771.79 kg/cm³인 것을 확인하였다. 상대적으로 RPF 시료가 RDF 시료보다 진밀도가 낮은 것으로 분석되었으며, 이는 RPF를 구성하고 있는 폐기물의 조성이 RDF 폐기물 조성보다 균일하고 성형이 쉬운 폐기물로 구성된 것으로 판단된다.

3.1.3. 삼성분

본 실험에 사용된 고형연료제품의 삼성분 측정결과를 Figure 2에 나타내었다. 분석결과, 수분은 1.01 ~ 5.70%, 회분 6.04 ~ 12.59%, 가연

Table 3. Experimental Result of Ultimate Analysis (unit : dry base wt%)

Items	F-RDF		P-RDF		F-RPF		P-RPF	
	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2
C	71.84	68.10	50.83	47.37	73.78	67.91	66.62	61.80
H	12.60	11.47	7.60	7.02	11.85	9.98	10.21	9.07
O	3.04	6.27	26.64	31.31	6.70	10.16	14.15	20.48
N	0.28	0.53	0.92	0.80	0.47	0.40	0.36	0.46
S	0.10	0.17	0.08	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03
Cl	1.78	1.36	0.75	0.77	0.57	2.94	0.51	1.88

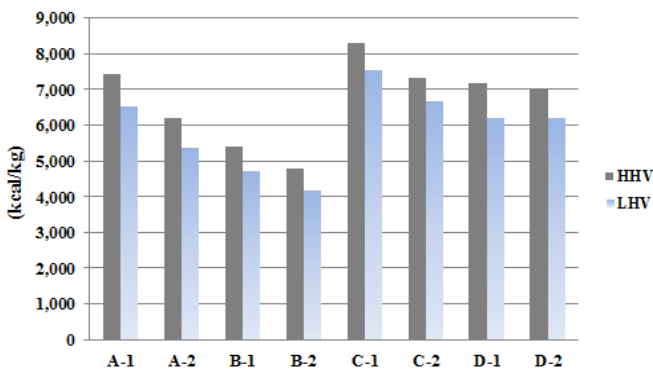


Figure 3. Experimental result of heating values.

분 함량 82.94~92.25%이었으며, RPF가 RDF보다 가연분 함량은 높고 회분 함량은 낮은 것을 확인하였다. 삼성분 함량 차이는 폐기물의 구성에 따라 좌우되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 pellet 형태의 시료가 fluff 형태의 시료보다 수분함량이 다소 높게 분석되었다. 이는 성형과정에서 Pellet 성형 형태 유지를 위해 첨가한 수분의 영향에 의한 것으로 판단된다.

3.1.4. 원소분석

고형연료제품의 원소분석 결과를 Table 3에 나타내었다. 분석결과, 탄소(C)함량 47.37~73.78%, 수소(H)함량 7.02~12.60% 포함되어 있었다. 연소시 NOx 발생 영향 원소인 질소(N)함량은 0.28~0.92%이었으며, SOx 발생원인 물질인 황(S)함량은 모든 시료에서 0.1% 이하로 분석되었다. 반면, 염소(Cl)함량은 0.51~2.94%로 다소 높은 함량을 보였으며, 고형연료제품 원료 중에 염소 함량이 높은 재료가 포함되어 있기 때문인 것으로 판단할 수 있었다. 또한 RPF가 비교적 RDF보다 탄소함량은 높으며 황 함량은 낮은 것으로 분석되었다.

3.1.5. 발열량

발열량 분석 결과를 Figure 3에 나타내었다. 발열량 분석 결과는 건 기준 고위발열량과 습기준 저위발열량 2가지로 분석하였다. 분석 결과 건기준 고위발열량 4803~8285 kcal/kg, 습기준 저위발열량 4192~7557 kcal/kg로 분석되었다. 발열량 분석결과, B시료(pellet RDF)가 상대적으로 발열량이 낮게 분석되었으며 이는 폐기물의 구성에 의한 영향으로 삼성분 분석결과에서 가연분이 상대적으로 낮고 회분이 높게 분석된 것과 상관성이 있는 것으로 확인할 수 있었다. 성상 및 형태별 발열량을 분석해보면, RPF가 RDF보다 발열량이 높고 fluff 시료가 pellet 시료보다 발열량이 높은 것으로 분석되었는데, 이는 제품을 구성하고 있는 폐기물의 성상 차이 때문인 것으로 확인할 수 있다.

3.2. 연소특성 분석

3.2.1. 연소시간에 따른 시료무게변화 특성

고형연료제품 시료의 연소 시간별 연소 온도 변화에 따른 고형연료제품의 투입 무게 변화에 대한 감량을 분석결과(Figure 4), RPF 시료의 감량은 91.3~93.8%, 강열감량 2.08~2.28%로 분석되었고 RDF 시료의 감량은 86.9~89.7%, 강열감량 2.27~4.35%로 분석되었다. Fluff 시료의 감량은 87.9~93.3%, 강열감량 2.11~2.77%, pellet 시료의 감량을 86.9~93.8%, 강열감량 2.08~4.35%로 분석되었다. 분석결과, RPF와 fluff의 감량이 높고 강열감량이 낮아 연소효율이 우수한 것으로 판단할 수 있다. 고형연료제품의 성상별(RDF, RPF) 연소시간에 따른 시료무게 변화 특성 분석결과, RDF 고형연료제품이 다종의 폐기물로 구성되어 있어 초기연소시작은 빠르나 총 연소시간은 길게 분석되었고 RPF 고형연료제품은 단일 플라스틱계 폐기물로 구성되어 있어 초기연소시작은 느리나 총 연소시간은 짧게 분석되었으며, 최대감량변화량(Max. dg/dt [= 1 min])도 RPF 고형연료제품이 RDF보다 큰 것을 알 수 있었다. 또한, 고형연료 형태별 연소특성은 fluff 형태가 연소 접촉 표면적이 넓어 pellet 형태에 비해 초기연소시작이 빠르고 총 연소시간도 단축되어 연소성이 우수하며, 최대 감량변화량은 fluff 형태 시료가 pellet 형태 시료보다 큰 것으로 분석되었다.

3.2.2. 연소가스 배출특성

고형연료제품 연소가스 배출특성을 Table 4에 나타내었다. 배출특성 분석 결과 산소농도는 일산화탄소농도(CO)와 배출 특성이 반비례 관계를 보였으며, 일산화탄소의 평균 발생농도는 687.2~1,350 ppm 범위였다. 일산화탄소 배출경향은 시료무게 변화 특성과 동일한 경향을 보였는데, 일산화탄소의 최대농도 배출구간과 시료의 최대 감량변화량(Max. dg/dt [= 1 min]) 구간이 대부분 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 진행된 실험결과와 비슷하게 Nawaraj Sanjeli[7]의 연구에서도 fluff 형태의 RDF가 pellet 형태의 RDF보다 연소진행(연소시간, 연소온도)에 따른 산소 농도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 질소산화물의 배출특성을 살펴보면, 질소산화물의 평균 발생농도는 17.46~25.11 ppm이었으며, 배출농도 편차는 일산화탄소에 비해 적게 나타났다. 배출 경향은 모든 시료에서 급격히 증가한 후 완만하게 감소하는 경향을 보였고 질소산화물의 최대배출시점은 대부분 최대 무게 감량 변화량 시점보다 다소 늦게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, NOx의 경우 고형연료제품 사용시설의 배출허용기준 NOx 70 ppm을 초과하는 구간이 연소중반 연소온도 400~550 °C 연소 구간에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다. HCl 배출농도는 시료의 성상별, 형태별 특이한 배출경향은 보이지 않았다.

Table 4. Air Pollutant Emission Characteristics

Items	O ₂ (%)	NOx (ppm)	CO (ppm)	HCl (ppm)
A-1	18.04	23.82	750.8	1.32
A-2	19.11	24.19	844.2	1.68
B-1	19.4	23.7	725.1	0.54
B-2	19.16	22.67	883.1	0.92
C-1	18.92	20.87	751	0.52
C-2	18.07	25.11	1,350	2.04
D-1	18.68	20.03	687.2	0.33
D-2	19.12	17.46	702.2	1.8

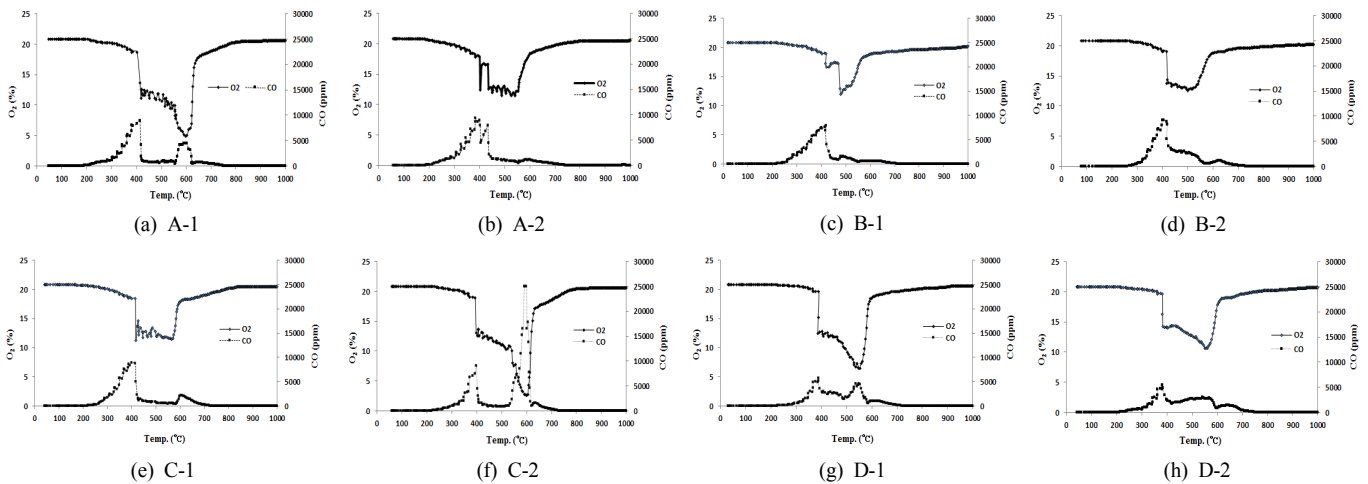


Figure 4. Correlation of O₂ and CO emissions according to the combustion time of sample.

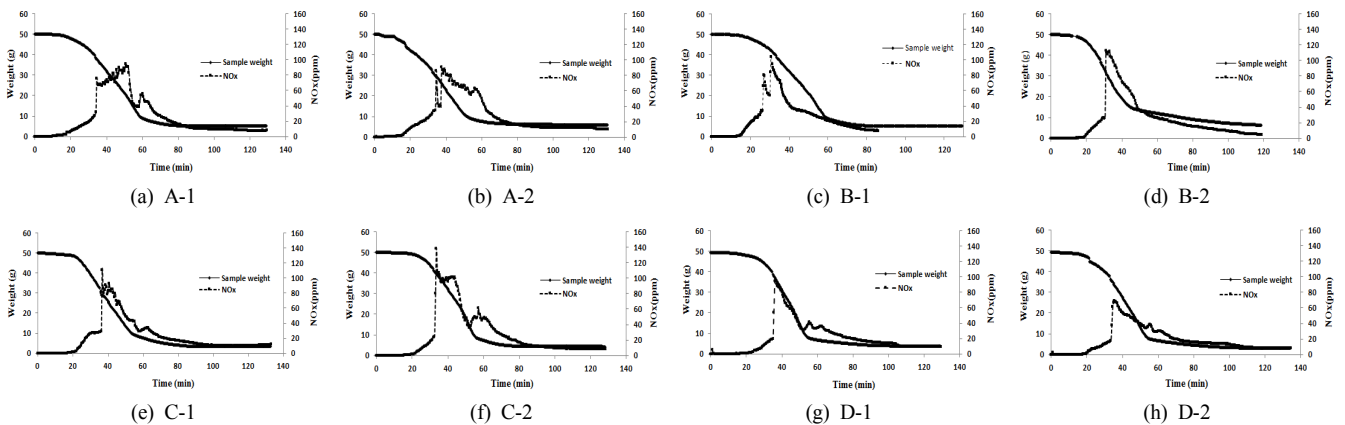


Figure 5. Correlated with NOx and sample weight according to the combustion time.

4. 결 론

고형연료제품의 물리화학적 특성 분석 결과 고형연료제품 크기는 성형 방식에 따라 크기 차이가 발생하였으며, 진밀도는 폐기물 성상이 균일하고 성형이 용이한 RPF 시료가 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있었다. RPF 시료의 발열량이 고열량 폐기물 구성으로 인해 RDF 시료보다 비교적 높게 분석되었다.

연소시간에 따른 시료무게 변화 특성을 살펴보면, RDF 고형연료제품이 다종의 폐기물로 구성되어 있어 초기연소 시작은 빠르나 총 연

소시간은 길게 분석되었고 RPF 고형연료제품은 단일 플라스틱계 폐기물로 구성되어 있어 초기연소시작은 느리나 총 연소시간은 짧은 것으로 확인되었다.

고형연료 형태별 연소특성은 fluff 형태가 연소 접촉 표면적이 넓어 pellet 형태에 비해 초기연소시작이 빠르고 총 연소시간도 단축되어 연소성이 우수한 것으로 판단되며, 최대 감량변화량은 fluff 시료가 pellet 시료보다 큰 것을 알 수 있었다.

고형연료제품 연소 가스 배출특성 결과, 일산화탄소의 배출경향은 시료무게 변화 특성과 동일한 경향을 보였으며, 일산화탄소의 최대농

도 배출구간과 시료의 단위시간당 고형연료제품 무게 최대 감량변화량(Max. dg/dt [= 1 min])구간이 대부분 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

References

1. S. C. Oh, J. H. Ryu, H. Kwak, S. Y. Bae, and K. H. Lee, Thermal degradation of high molecular components obtained from pyrolysis of mixed waste plastics, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**, 191-198 (2008).
2. K. H. Lee, Thermal degradation of heavy pyrolytic oil in a batch and continuous reaction system, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **86**, 348-353 (2009).
3. S. Karagoz, T. Karayildirim, S. Ucar, M. Yuksel, and J. Yanik, Liquefaction of municipal waste plastics in VGO over acidic and non-acidic catalysts, *Fuel*, **82**, 415-423 (2003).
4. P. Klimantos, N. Koukouzas, A. Katsiadakis, and E. Kakaras, Air-blown biomass gasification combined cycles (BGCC): System analysis and economic assessment, *Energy*, **34**, 708-714 (2009).
5. G. Luc, P. Maria, V. Razvan, B. Jerome, T. Mohabd, G. Benny, and H. Ulrik, Numerical investigation of the partial oxidation in a two-stage down draft gasifier, *Fuel*, **87**, 1383-1393 (2008).
6. Y. C. Byun, M. H. Cho, J. W. Chung, Y. S. Kim, J. H. Lee, C. R. Lee, and S. M. Hwang, Plant test of thermal plasma process of pyrolysis/gasification/vitrification of municipal solid waste, *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 6680-6687 (2010).
7. N. Sanjel, J. H. Gu, W. T. Kwon, and S. C. Oh, A Study on the combustion characteristics of pelletized and fluff RDF (refuse derived fuel), *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 333-338 (2012).