

고형연료화 가능 사업장 폐기물 중 폐합성 수지류의 연소특성 평가

이원준[†] · 김성욱^{*}

전남대학교 환경시스템공학과

^{*}코오롱워터앤에너지(주)

A Study on Combustion Characteristics of Waste Plastics Included in Industrial Waste for Solid Refuse Fuel Production

Weon-Joon Lee[†] · Sung-Ug Kim^{*}

Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University

^{}Kolon Water and Energy Co., Ltd.*

Abstract

From 2013. 1st of April, new regulation has been promulgated to imply extending the raw resource waste material of refuse fuel, and its classification has been united as SRF (Solid Refuse Fuel) from RDF (Refuse Derived Fuel), RPF (Refuse Plastic Fuel), and TDF (Tire Derived Fuel). By the new regulation, new plastic waste from industry can be utilized to produced the SRF, and production of SRF in Korea will be expected to increase to be commensurated with the Renewable Energy Obligation. In this study, Industrial plastic waste are tested for combustion characteristics to evaluate the possibility for SRF utilization and compared their pyrolysis temperature pattern for combined production of SRF. According to the results, it would be possible to mix various types of industrial waste plastics for production of SRF due to the temperature range of pyrolysis. The volatile gas velocity, however, is not similar to each other, ranged from 0.15 g/°C to 1.2 g/°C To utilize the mixed waste plastics from industry to produce the SRF, the combustion chamber using this type of SRF must be designed to prepare enough secondary combustion chamber.

Keywords : SRF (Solid Refuse Fuel), Industrial Waste Plastics, Combustion Characteristics, Pyrolysis

1. 서론

최근 지구온난화 및 자원고갈 문제로 인하여 효율적 에너지 이용과 자원 절약이 사회적으로 중요한 관심으로 부각되고 있다. 이와

같은 추세를 반영하여 폐기물은 귀중한 자원인 동시에 에너지 생산에 이용될 수 있는 가치를 가지는 연료물질로서 인식이 확대되고 있다. 이러한 폐기물의 연료적 이용이 폐기물을 원료물질로서 재활용하는 물질재활용에

[†]Corresponding author E-mail: leewj@jnu.ac.kr

비하여 친환경적이라고 할 수 없으나, 발생되는 폐기물은 형태상 물질재활용이 불가능한 경우가 많다. 따라서 이와 같이 물질재활용이 불가능한 물질을 그대로 매립하는 것에 비하여 연료로서 이용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 또한 폐기물을 연료로서 재활용하는 것을 열적재활용(Thermal Regeneration, Thermal Recycling)이라고 하고 있다. 국내의 “폐기물 관리법”에서 열적재활용에 해당하는 시설의 열효율을 75%이상으로 엄격하게 규제하고 있으며, 이를 만족하는 시설에서 이용되는 폐기물에 한정하여 열적재활용으로, 이에 미치지 못하는 경우에 대하여는 단순한 폐기물 처리로 규정하고 있다¹⁻³⁾.

국내에는 폐기물 에너지의 이용 및 매립폐기물의 최소화를 위하여 폐기물 연료화 사업이 진행 중이다. 이와 같이 폐기물을 일정 기준에 맞추어 연료화하여 생산된 물질을 “폐기물 고형연료”라고 한다. 국내의 폐기물 고형연료의 정책은 과거 일본과 유사한 성격을 가지고 있었으나, 최근에는 유럽의 정책방향에 접근하고 있다. 이에 따라 2013년 4월 1일부터 새로운 “폐기물 고형연료 시행규칙”이 시행되었다. 개정된 시행규칙은 폐기물 고형연료로 이용 가능한 폐기물의 범위를 사업장폐기물(지정폐기물 제외)로 확대하고, 분류기준을 SRF(Solid Fuse Fuel)로 단일화하고, 이에 따른 품질관리 기준을 강화한 것이 주요내용이라고 할 수 있다^{1,3)}.

개정된 폐기물 고형연료의 품질기준 제도 및 분류기준의 변화는 향후 신재생에너지에서 차지하는 폐기물 연료가 차지하는 비중을 높이는데 필요한 것으로서, 정부의 계획에 따르면 2016년 약 75%의 신재생에너지를 폐기물을 이용하여 생산하는 것으로 예상하고 있다¹⁾.

현재의 법 개정에 따라 상당량의 사업장폐기물이 고형연료로 생산되어 이용될 것으로 사료되며, 이에 대하여 각 사업장에서의 대책은 아직 미흡한 것으로 판단된다. 신재생에너지에는 태양에너지, 바이오에너지, 풍력에너지,

연료전지, 폐기물 에너지 등 많은 종류의 신재생에너지가 있지만 폐기물 에너지는 잠재가치가 크기 때문에 현시점에서 가장 유망한 에너지원이라 할 수 있다. 또한 폐기물은 여러 가지 환경문제와 인간에 유해한 영향을 끼치므로 체계적인 관리가 필요하며, 우리나라의 경우 매립과 소각 위주의 폐기물 정책과 폐기물 해역배출 금지 등에 따라 폐기물의 처리에 대한 보완이 필요하다^{1,5-8)}.

다른 한편으로는 화석 연료의 국제적 가격이 급등하면서, 기존에 버려지던 새로운 형태의 에너지를 찾기 시작했으며, 이 중 세계적으로 관심이 증가되는 것이 폐기물 에너지라고 할 수 있다. 그러나 폐기물은 성상, 형상 및 발열량 등의 변동이 심하고 폐기물량의 변동이 심하여 연료로 사용하기 어려워, 사용하기 적합한 형태로 변환한 것이 폐기물 고형연료(SRF) 제품이다⁹⁻¹⁰⁾.

본 논문에서는 개정된 폐기물 고형연료 정책에 따라, 이용이 예상되는 사업장에서 발생하는 폐플라스틱의 연소특성을 파악하고, 이를 혼합하여 폐기물 고형연료 생산에 이용할 수 있는 가능성을 파악하기 위하여 연소 특성 및 열분해 특성을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 전라남도 지역에서 발생되는 사업장폐기물 중 플라스틱 및 비성형 SRF의 총 10 종류의 시료를 채취하고 이에 대한 열분석 및 연소특성에 대하여 검토하였다. 실험에서 사용된 시료의 경우, 수분함유량이 적어 삼성분 분석은 실시하지 않았으나, 연료적인 특성 파악을 위하여 원소분석을 실시하였다. 또한 폐기물 고형연료의 품질기준을 만족하는지의 여부를 파악하기 위하여 각각의 사업장 폐기물 중 포함된 중금속 및 염분과 황분의 함유량을 측정하였고 이를 폐기물 고형연료의 품질기준과 비교 검토하였다. 또한 각 시료에 대하여 열분해 · 연소 실험을 실시하

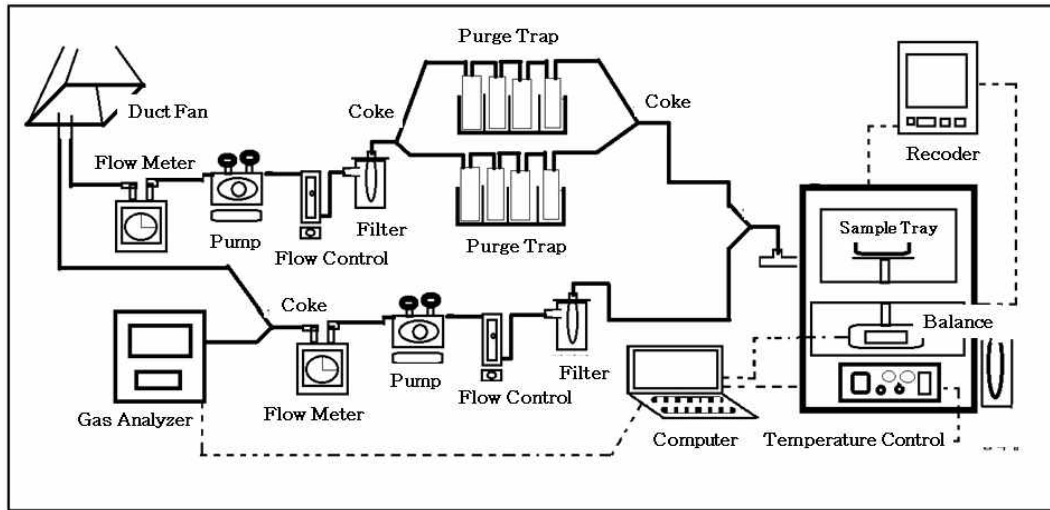


Fig. 1. TGA experimental apparatus for combustion.

였다. Fig. 1은 열분해 연소·열분해 실험에 이용된 TGA (Thermo gravimetric Analysis) 장치이다.

TGA 장치는 시료의량을 약 50 g까지 이용할 수 있도록 제작되었으나, 본 연구에서는 약 30 g 정도의 시료로 실험을 실시하였다. 산화제로는 공기를 이용하였으며, 공기공급은 열분해·연소과정 중 연소가스 채취를 위한 흡입에 따라 연소로 내부에 발생하는 부압에 의하여 자연적으로 외부공기가 공급될 수 있도록 하였다. 연소 온도는 초기 수분의 증발을 막기 위하여 100℃ 이하에서 시작하였으며, 약 10℃/분의 속도로 온도를 상승시켜 최종온도가 1000℃가 되도록 하였다. 열분해·연소과정에 따른 중량 감소는 하부에 부착된 밸런스(Mettler Toledo, ML 4002)에 의하여 연속적으로 측정되었으며, 이때 측정된 데이터는 기록계(Yokogawa MV2000)에 의하여 저장되었다. 실험 후 기록계의 데이터는 컴퓨터에서 변환·이용되었다. 연소 후 발생하는 가스 중 일산화탄소(CO : Carbon Monoxide) 질소산화물(NOx : Nitrogen Oxides), 산소(O₂ : Oxygen), 이산화탄소(CO₂ : Carbon Dioxide)는 가스분석기(Kane International Limited, KM9106)를

이용하여 연속적으로 측정하였다¹¹⁻¹²⁾.

Fig. 2는 본 실험에 이용된 폐기물 시료를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폐기물 시료의 연료특성 분석

3.1.1. 시료별 발열량 분석 (고위발열량 기준)

시료별로 발열량을 측정하였으며, 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 전체적인 시료 중 상대적으로 발열량이 낮은 종이류 등이 거의 포함되어 있지 않아 시료 #1 및 시료 #3을 제외하고는 전체적으로 5,000 kcal/kg을 초과하였다.

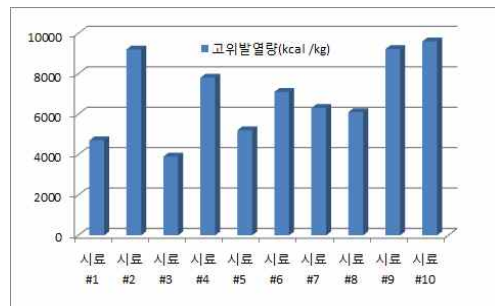


Fig. 3. Heating value of waste sample (As Received Basis)

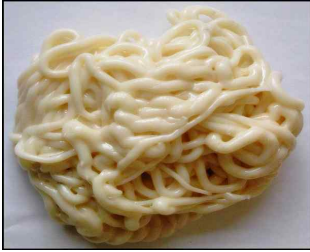
		
사업장 배출시설계(#1)	사업장 배출시설계 (#2)	비성형 SRF (#3)
		
사업장 생활계 (#4)	사업장 생활계 (#5)	마대자루 (폴리백) (#6)
		
마대자료 (폴리백) (#7)	사업장 배출시설계 (#8)	원료 포장재 (#9)
#10 시료 : PP 조각		

Fig. 2. Waste plastics and fluff SRF Sample.

시료 #1은 사업장 배출 시설계폐기물로서 구체적인 성분은 알 수 없으나, 일부 모직류와 종이 등이 혼합된 것으로 사료되었다. 시료 #3의 경우는 비성형 SRF로서 현재 일부 재활용 시설에서 시험을 위하여 제작된 것으로 종이 등의 저발열량 폐기물이 혼합되어 전체적으로 낮은 발열량(약 3,800 kcal/kg)을 나타내었다. 이는 현재 SRF 발열량 기준인 3,500 kcal/kg을 만족시키는 수준으로 생활폐기물을 이용하여 생산된 RDF와 유사한 정도의 발열

량이라고 할 수 있다.

3.1.2. 시료별 원소분석(C, H, O, N)

시료별로 원소분석을 실시하였으며, 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 전체적으로 탄소의 함유량이 높았으며, 이는 플라스틱의 원료가 대부분 탄소와 수소로 구성되어있는 것이 이유로 판단된다. 그러나 발열량이 상대적으로 낮았던 시료 #1과 시료 #3의 경우, 산소의

함유량이 높았다. 이는 섬유류 및 종이류에 의한 것으로 판단된다. 그러나 품질기준에는 원소분석에 대한 항목이 없으나, 향후 탄화 및 가스화 등의 방법으로 SRF를 이용하는 경우, 시료 #3은 부적절할 수 있다.

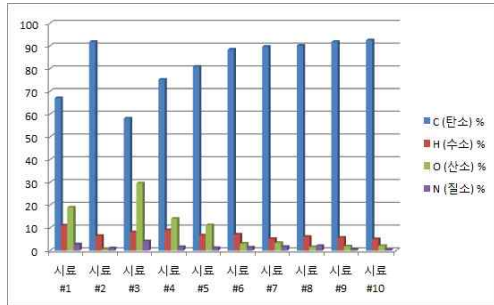


Fig. 4. Ultimate analysis of waste sample.

3.1.3. 시료별 중금속 분석(고형연료 규제대상 중금속)

시료별로 고형연료 품질기준의 중금속 항목에 해당되는 수은, 카드뮴, 납, 비소의 함유량을 측정하였으며, 수은의 경우 전 시료에서 검출한계(0.01 mg/kg)이하로 측정되었다. 기타 중금속의 결과는 다음 Fig 5~Fig 7에 나타내었다. 카드뮴의 경우 대부분의 시료가 고형연료 품질기준치인 5 mg/kg의 약 50%이하의 함유량을 나타내어 사업장 폐기물의 경우 상대적으로 낮은 농도의 카드뮴을 포함한 것을 알 수 있었다. 그러나 납의 경우, 혼합되어 발생하는 사업장폐기물(시료 #3, 시료 #4, 시료 #7)에서 높게 나타나고 있다. 또한 파란색의 마대자루인 시료 #7에서도 높게 관찰되었다. 납 함유량의 경우, 사업장 폐기물 중 상품화된 후 발생한 폐기물에서 전체적으로 높게 관찰될 수 있다. 비소의 경우는 폐기물의 종류에 따른 함유량의 차이가 비교적 크게 나타났으나, 전체적으로 기준치(13 mg/kg)이하의 함유량을 보여주고 있다. 시료 #1의 경우 비소 함유량이 약 11 mg/kg 정도로서 품질관리를 위하여 SRF생산시 주의가 필요한 것으로 사료된다.

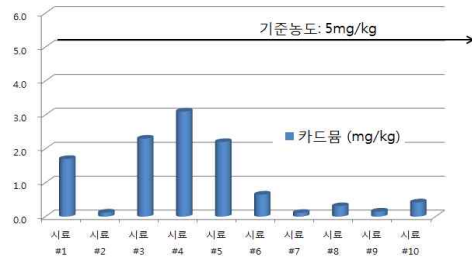


Fig. 5. Cadmium(Cd) contents in waste sample.



Fig. 6. Lead(Pb) contents in waste sample.

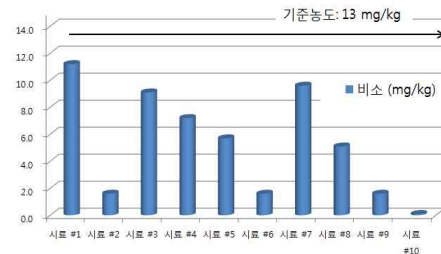


Fig. 7. Arsenic(As) contents in waste sample.

3.1.4. 시료별 염분 및 황분 (Cl, S)

Fig. 8~Fig. 9는 폐기물 시료 중 포함된 염분 및 황분을 측정하여 나타내었다. 폐기물 시료 중 염분의 경우, 시료 #1을 제외하고 품질기준 농도인 2%를 만족하고 있었다. 그러나 시료 #1은 품질기준은 2%를 약간 상회하고 있는 것으로 나타났다. 또한 상대적으로 사업장 생활계폐기물(시료 #4 및 시료 #5)에서의 염분농도가 다른 사업장 폐기물에 비하여 높았다. 황분의 경우, 시료 #5(사업장 생

활계폐기물)을 제외하고는 매우 낮은 농도를 나타내었다. 전체적으로 현재의 고형연료 품질기준인 황분 0.6%를 만족할 수 있었다.

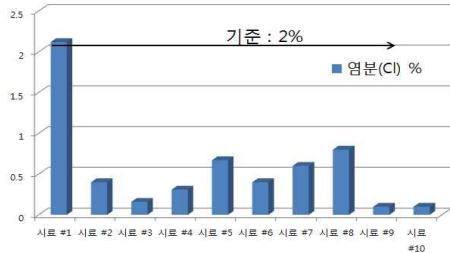


Fig. 8. Chlorine contents in waste sample.

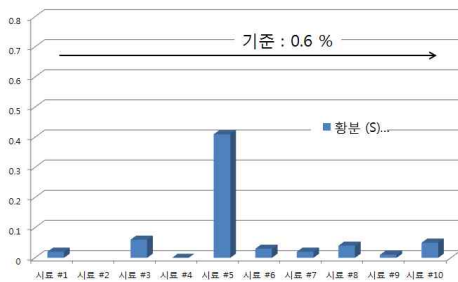


Fig. 9. Sulfur contents in waste sample.

3.2. 폐기물 시료의 연소특성 분석

폐기물 연소특성의 경우, 열분해특성(TGA 실험) 및 단위 온도에 따른 열분해속도, 또한 각 온도별 연소가스 배출 특성으로 나누어 검토를 실시하였다.

3.2.1. 열분해 특성

각 폐기물 시료는 초기 100℃에서 최대 1000℃까지 승온시키면서 각 온도 구간에서의 열분해 특성을 파악하였다. 열분해 특성은 각 폐기물 시료를 연소시키는 경우 휘발성 가스가 발생하는 구간으로, 이에 따라 화격자의 온도구간 및 면적이 결정된다. 즉 열분해 구간이 넓은 경우 필요한 화격자의 면적이 증가되며, 결과적으로 적정 연소조건의 결정이 어

렵게 된다. Fig. 10은 각 폐기물 시료의 온도별 연소조건을 종합하여 나타내었다.

실험 결과 대부분의 폐기물 시료의 열분해 온도 구간은 약 300℃에서 시작되어, 약 500℃에서 종료되는 것으로 나타나고 있다. 또한 전체적으로 약 900℃이상에 잔류하는 회분량이 유사한 것을 알 수 있다. 폐기물 열분해가 종료되는 온도가 기타 화석연료(특히 석탄)에 비하여 낮은 온도이며, 생활폐기물로 생산된 SRF의 열분해 구간에 비하여 낮다. 이는 플라스틱류의 연소 특성으로 기타 폐기물의 혼합에 의하여 열분해의 속도를 조절하는 것이 사용에 용이할 수 있다.

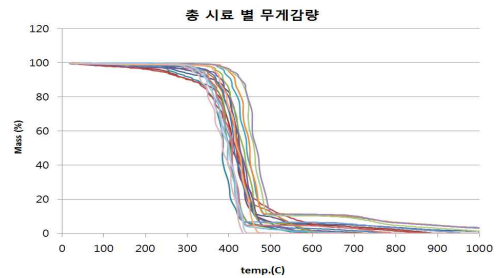


Fig. 10. Pyrolysis behavior of waste samples.

3.2.2. 열분해 속도 특성

열분해 속도는 폐기물의 열분해에 따른 휘발성가스의 발생속도와 관계된다. 즉 열분해속도가 빠른 경우, 휘발성 가스의 발생량이 상대적으로 많으며, 순간적으로 좁은 온도 구간에서의 중량감소가 급격히 발생된다. 이를 측정하기 위하여 단위 온도에 따른 열중량감소($\Delta \text{Weight} / \Delta \text{Temperature}$)를 측정하고 이 값이 큰 경우 열분해 속도가 빠른 것으로 규정할 수 있다. 또한 열분해 속도가 빠른 경우, 일반적으로 연소가 용이한 열분해가스가 주류를 이룬다. Fig. 11은 각 시료의 열분해 속도를 나타내고 있다. 그림으로부터 가장 낮은 열분해 속도를 나타낸 것은 Fluff SRF이며, 이는 종이류 및 기타 가연물이 혼합되어 상대적

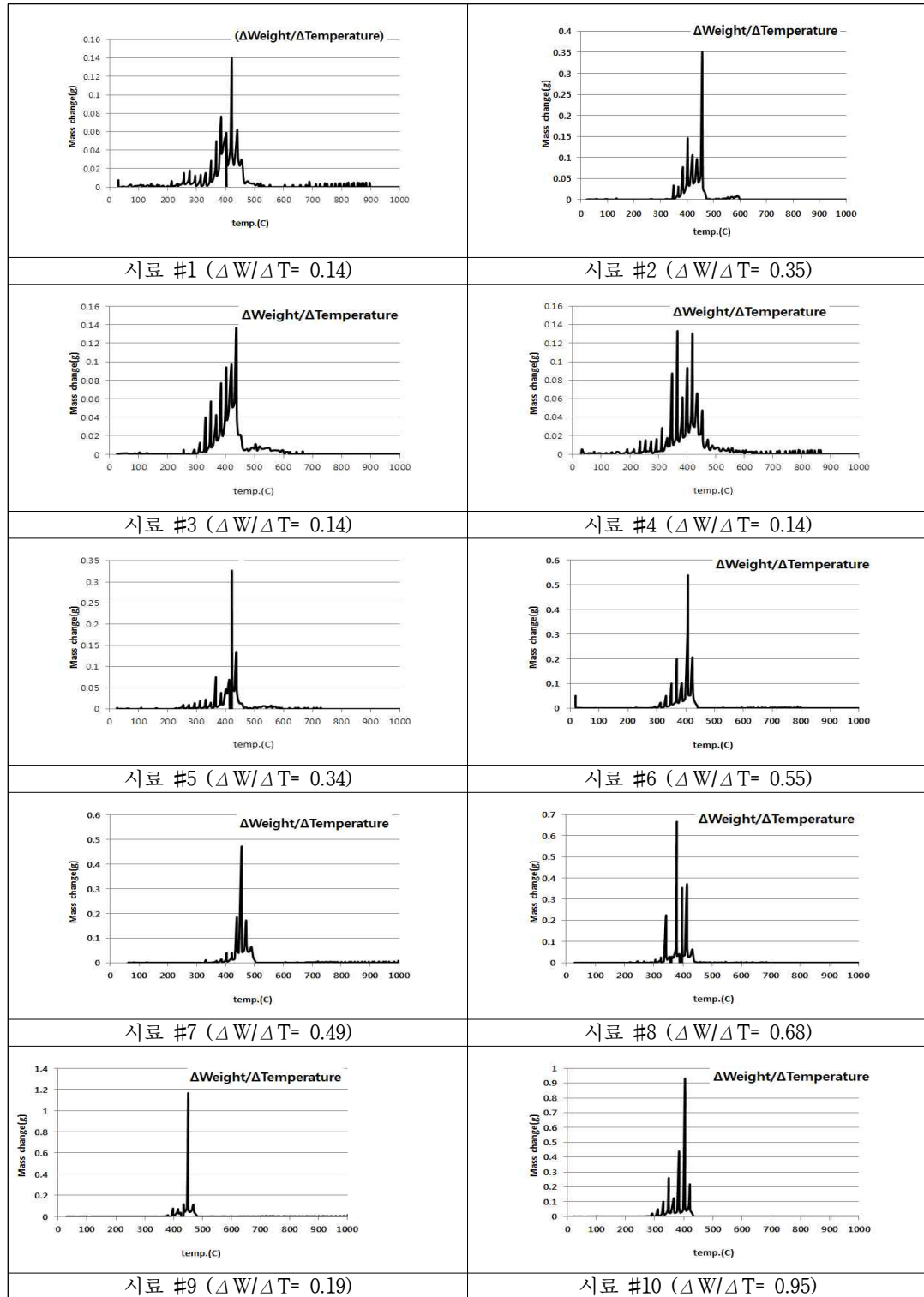


Fig. 11. Pyrolysis velocity of waste sample.

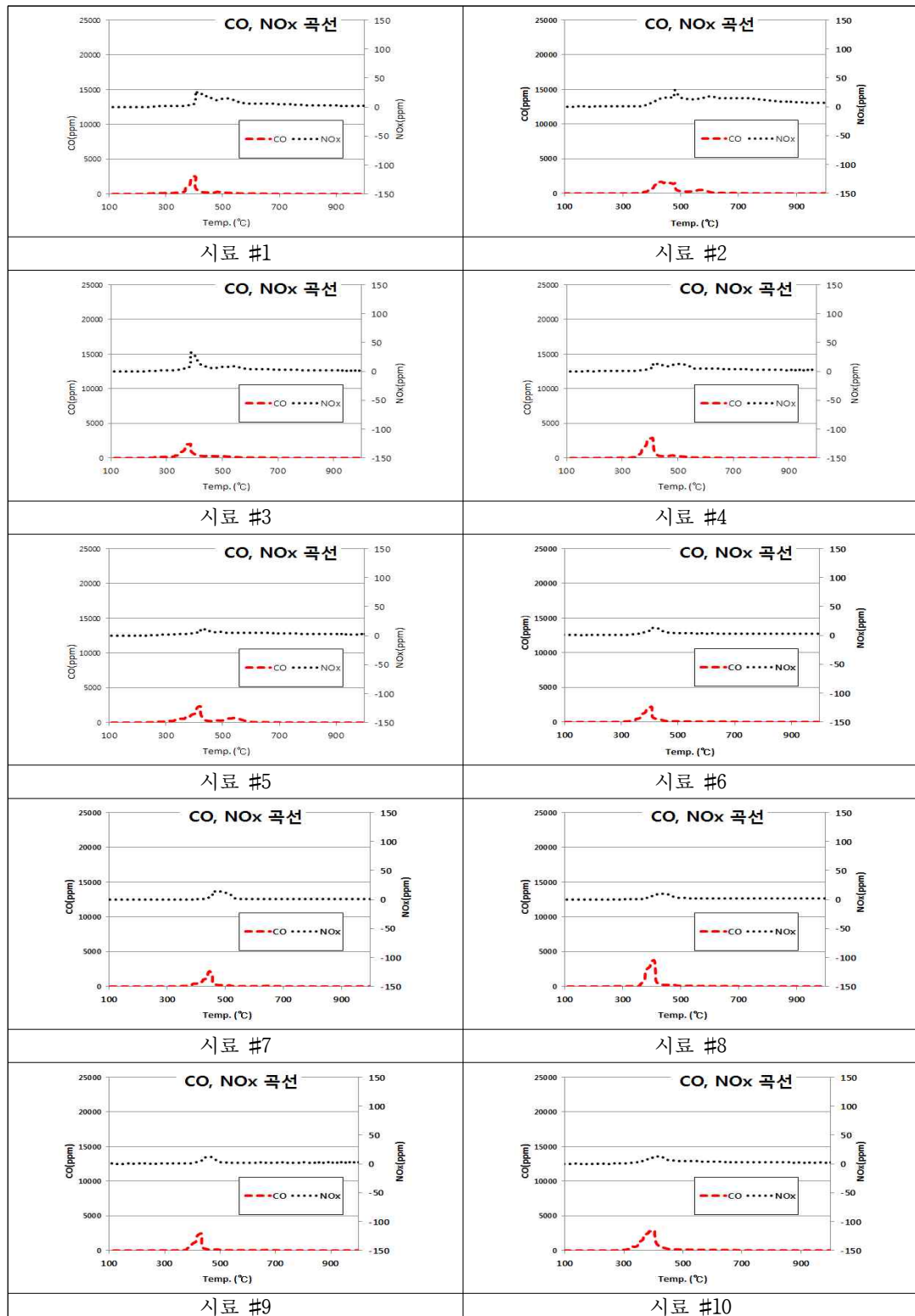


Fig. 12. Flue gas from pyrolysis and combustion.

으로 열분해 속도가 낮은 것으로 판단된다. 반면 비교적 순수한 폐합성수지인 시료 #10의 열분해 속도가 가장 높았다.

3.2.3. 연소가스의 발생특성

Fig. 12는 연소과정 중 발생하는 CO 및 NOx의 발생특성을 나타내고 있다.

발생되는 CO 및 NOx의 농도는 폐기물 시료의 종류에 크게 관계 되지 않는 것으로 판단되었으며, 각각의 폐기물을 이용하여 고형 연료를 생산하고 이용하는 시설의 연소가스는 전체적으로 균질한 2차 연소공기의 공급으로 연소가 가능할 것으로 판단되었다¹³⁾.

4. 결 론

사업장폐기물로서 발생하는 폐합성수지류 및 미성형 SRF의 원료적 특성 및 연소특성을 검토하였으며, 실험결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 본 연구에서 실험된 시료의 발열량의 경우, 현재 SRF의 기준인 3,500 kcal/kg이상을 전부 만족 시키고 있었으며, 다른 종류의 폐기물에 비하여 양질의 발열량을 나타내고 있었다.
- 2) 본 연구에서 실험된 시료인 사업장폐기물 폐합성수지의 경우 전체적으로 현재 개정된 폐기물 고형연료기준을 만족시킬 수 있었다. 원료 중 중금속의 경우, 상대적으로 비소가 농도가 높았다. 또한 일부 시료에서 염소의 농도가 기준치를 초과하고 있었으나, 다른 사업장폐기물 폐합성수지의 염분 농도가 낮아, 혼합이용 시 문제가 없는 것으로 판단된다.
- 3) 각 폐기물 시료의 열분해 조건은 대부분의 유사한 온도영역에서의 열분해 패턴을 보이고 있었으나, 열분해 속도의 경우 다소 차이를 보이고 있었다. 즉 단순한 공정폐기물의 경우, 상대적으로 빠른 열분해 조건을 나타내었다.

- 4) 연소가스의 경우, 각 폐기물 시료에 따른 큰 차이를 보이고 있지 않았으며 이는 혼합하여 연료를 생산하여 에너지를 생산하는 경우, 연소시설에 추가적인 보완이 요구되지 않는 것을 나타낸다.

사 사

본 연구는 전남녹색환경지원센터 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. 이원준(2011), 고형연료 제품 물질기준 (안) 공청회.
2. 한국환경공단(2010), 폐자원에너지화 기술포럼 발표자료집.
3. 환경부(2011), 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 시행규칙(별표 7).
4. QUOVADIS(2008), CEN/TC 335/WG 2.
5. Julien Blondeau, Hervé Jeanmart(2012), Biomass pyrolysis at high temperatures prediction of gaseous species yields from an anisotropic particle, Biomass and Bioenergy, 41, pp. 107-121.
6. J. Lédé(2003), Reaction temperature of solid particles undergoing an endothermal volatilization. Application to the fast pyrolysis of biomass, Biomass and Bioenergy, 7, pp. 49-60.
7. 환경부(2010), 전국폐기물 발생 및 처리현황.
8. EU Committee(1997), Landfill Directive, 99/31/EC.
9. Anurag G., Richard S., Daryl H., Nigel S., and Siomon B.(2007), Waste as Co-Fuel, The Policy Framework for Solid Recovered Fuel (SRF) in Europe, with UK Implication, Environmental Science and Technology, 24, pp. 4868-4874.

10. Juliet Currie(2008), The Valorization of SRF In Cement Kilns, Heidelberg Cement.
11. 환경부(2007), 대기오염공정시험방법.
12. 환경부(2009), 대기환경보전법 제16조제1항, (「대기환경보전법 시행규칙」 제15조 및 별표8).
13. 이원준, 윤오섭(2013), 생활폐기물 고형연료 생산공정 차이에 따른 고형연료의 연소 특성 비교, 한국폐기물자원순환학회지, 29(3), pp. 310-316.