



배연가스 분석에 의한 가연성과 유기성폐기물을 혼합한 고행화연료 연소 특성평가

하상안[†]

신라대학교 환경공학과[†]

(2009년 7월 22일 접수일, 2009년 9월 24일 수정일, 2009년 9월 27일 채택일)

Characteristics Evaluation of Combustion by Analysis of Fuel Gas Using Refuse-derived Fuel by Mixing Different Ratios with Organic and Combustible Wastes

Sang-An, Ha[†]

Dept. of Environmental Engineering, Silla University[†]

ABSTRACT

The main objective of this study is to investigate the characteristics of combustion by analyzing fuel gases from a combustion equipment with various combustion conditions for refuse-derived fuels (RDFs). CO gas is a parameter for indicating of incomplete combustion during a combustion process. The lowest CO gas was produced when the experiment conditions were $m=2$ under air-fuel condition and 800°C . CO_2 gas is a final product after complete combustions. The highest amount of CO_2 gas was produced when the experiment conditions were $m=2$ under air-fuel condition and 800°C . The highest level of SO_2 gas was produced in S.1 sample containing the highest sulfur. The highest level of NO_x gas was produced in S.1 sample with the highest nitrogen content and air-fuel condition of $m=2$ under temperature of 800°C . HCl gas that is generated by reacting with metals catalyst through oxygen catalyst reaction during combustion process is a precursor of dioxin formation. The higher level of HCl gas was produced in the sample with higher chlorine content. The lowest level of HCl gas was produced when the experiment conditions were air-fuel condition of $m=2$ and 800°C . The lowest level of NH_3 gas was generated when the experiment condition was $m=2$ under air-fuel condition and after 3 minutes. Air-fuel condition is more important to create NH_3 gas than operating temperatures. Higher level of H_2S gas was generated in S.1 sample with the higher sulfur content and was created in RDFs that contain higher mixture ratios of sewage sludge and food wastes. A result of combustion, gases and gases levels from the combustion of S.1 and S.2 were very similar to the combustion of a stone coal. As results of this research, when evaluating the

[†]Corresponding author : saha@silla.ac.kr

feasibility of the RDFs, the RDFs could be used as auxiliary and main fuels.

Keywords : Combustion, Refuse-derived fuel, Recycling of organic wastes, Fuel gas

초 록

본 연구는 가연성폐기물, 음식물폐기물 및 하수슬러지를 혼합하여 연료로 제조하여, 연소장치에서 다양한 연소조건에 따라 배출되는 배연가스를 분석하여 연소특성을 조사하였다.

CO가스성분은 연소과정에서 불완전연소 부분을 평가하는 가스성분으로서, 연소장치의 실험조건이 온도 800℃와 공기비 2일 때 가장 낮게 발생하였다. CO₂는 시료가 완전 연소되어 최종적으로 발생하는 부산물로서 연소조건이 가장 최적상태인 온도 800℃와 공기비 2일 때 가장 높은 농도가 발생하였다. SO₂발생은 시료 중에 황 함유량이 높은 S.1에서 높게 나타났다. NO_x는 질소성분이 높은 S.1시료와 온도 800℃의 조건에서 공기비 m=2의 조건에서 NO_x의 발생이 높게 나타났다. HCl가스는 연소과정에서 산소의 촉매 반응을 통해서 분진이나 금속촉매물질과 반응하여 다이옥신류를 발생시키는 전구물질로서 분석결과에서 보면 시료의 Cl함유량이 많은 시료와 동일한 시료에서 온도 800℃와 공기비 2일 때가 가장 낮은 HCl의 농도가 발생되었다. NH₃는 시료의 혼합비율과 온도조건보다는 공기비 2일 때 연소시작 3분 후에 가장 낮게 나타났으며, 연소온도 보다는 공기비가 NH₃의 생성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. H₂S발생은 시료의 황 함유량이 높은 S.1시료와 하수슬러지나 음식물쓰레기 혼합 비율이 높은 경우 높게 나타났다. 연소실험에서 혼합비율에 따라서 제조된 S.1과 S.2의 시료를 연소한 결과 CxHy농도 무연탄 연소시 발생농도와 비슷하게 나타남으로서, 성형하여 제조된 연료는 보조연료 및 주연료로서 가치가 있는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 연소, 고체연료화, 유기성폐기물 재활용, 배연가스

1. 서론

산업의 고도성장과 생활수준의 향상으로 하수처리장은 급격히 증가하고 있는 추세이고, 슬러지 량은 급격히 증가하고 있다. 또한 음식물 쓰레기는 악취나 취급의 문제로 버려지는 자원이 증가하고 있는 추세로 화석연료의 감소로 에너지원 재사용의 문제가 새로운 시각에서 접근되고 있다. 하수슬러지 해양투기에 따라서 런던협약 '96의정서 발효를 앞두고 해양투기 금지에 관련한 제1기준은 2008년 8월, 제2기준은 2011년 2월부터 적용되어진다. 또한 2012년부터는 하수슬러지 및 축산폐수의 해양배출을 금지하는 것으로 국무회의에 보고됨에 따라 해양오염방지법 시행규칙 개정 예정이다. 그간 해양에 배출해오던 하수슬러지(발생량의 77%)를 재활용, 소각 등의 방법으로 처리해야 하므로

이에 대한 체계적 계획 마련이 필요한 실정이다.¹⁻³⁾

우리나라에서 발생하는 생활폐기물과 유기성폐기물을 에너지원으로 재활용되는 기술이 개발되고 있는 폐기물고형연료(Refuse Derived Fuel, RDF)가 차세대 에너지로 대두되고 있다.⁴⁾ 따라서 RDF란 폐기물로부터 얻어지는 연료를 의미하며, 석유, 석탄 등의 화석연료 고갈에 따른 에너지의 공급불안, 지구환경문제, 자원의 효율적 이용 관점에서 귀중한 에너지 공급의 일익을 담당할 수 있으며, 유기성폐기물인 하수슬러지 및 음식물쓰레기 처리와 재생에너지 개발의 측면에서 주목되는 공정기술이다.⁵⁾

특히, 음식물쓰레기로 버려지는 자원이 8조원 정도로 정부예산 13%에 맞먹는다. 최근 화석연료의 고갈로 신재생에너지 보급이 확대되고 있는 시점에서 폐기물 재생에너지는 환경친화적 에너지개발의 차원에서

잠재가치가 크기 때문에 연료화 기술이 필요한 시점이다.⁶⁾

현대 사회의 주 에너지원인 석유와 석탄의 경우 그 매장량이 한정적이다. 석유의 경우는 앞으로 40년, 천연가스는 60년, 석탄의 경우는 330년을 예측하고 있어 새로운 대체에너지의 확보가 시급한 현안이 되고 있다.⁴⁾ 국내의 경우는 산업이 다소비 에너지 구조로 되어 있으며 더욱이 OPEC을 중심으로 한 산유국들의 고유가 정책이 앞으로 지속될 것으로 예상되므로 대체에너지 개발 및 상용화에 대한 대책이 시급하다. 특히 국내의 대체에너지 비율은 현재 1.04%로 OECD 국가에 비해 약 4%로 그 비율로 상당히 낮은 편이며, 이는 국내의 총폐기물에 대비하여 20%만이 활용되고 있는 것이다.^{4,5)}

저유가 시대에는 유기성폐기물과 일반폐기물의 연료화가 경제적인 측면에서 큰 효과가 없었지만, 2008년도 고유가시대와 저탄소녹색기술에 폐기물을 이용한 재생에너지개발기술이 큰 호응을 얻고 있다. 과거에는 우리나라의 RDF 제조기술은 외국기술을 직접적으로 도입하는 수준을 넘어 국내 폐기물 실정에 맞는 RDF 제조설비를 자체 개발하여 RDF를 생산할 수 있는 단계에 이르고 있다고 평가하고 있다.⁶⁾ 특히 RDF제조외국사례로서 미국의 경우는 ASTM에서 c-RDF (coarse), f-RDF (fine), d-RDF (densified) 등을 1번부터 7번까지 규격화하여 제품을 분류하여 사용하고 있으며, 일본은 폐기물처리의 정역화 정책을 수립하여 지자체별 사정에 맞게 대형 소각이나 RDF화를 도입 권장하고 있어 실용화가 되고 있다. 유럽은 소각기술의 발달로 관심은 다소 낮으나 20여 곳의 플랜트가 건설 가동 중에 있다.⁸⁾ 그 중 하수슬러지의 경우는 생활수준의 향상 및 하수처리의 비율이 높아짐에 따라 그 비율이 증가하고 있는 추세이며, 2005년 기준으로 약 285만톤/년이 배출되고 있다. 슬러지처리비용은 2억1천만원/년이며, 배출된 하수슬러지는 대부분 해양투기 및 직·매립으로 처리되었으나, 앞으로 해양투기 및 직·매립이 금지가 됨에 따라, 그 처리방법에 대한 모색이 절실하게 이루어지고 있다. 고유가 시대에 차세대 재활용 대체에너지로 대두되고 있는 RDF는 석유,

석탄 등의 화석연료 고갈에 따른 에너지의 공급불안, 지구환경문제, 자원의 효율적 이용관점에서 귀중한 일익을 담당할 것으로 기대되고 있다.⁵⁾

국내의 RDF제조 기술은 제조설비 자체적으로 개발하여 RDF를 생산하는 단계에 있으며, 품질도 우수한 것으로 나타나고 있다.⁹⁾ 고체연료화의 경우 수송성과 저장성이 향상되어 열 사용시설에서 적용성과 열효율이 커져 대체 연료로서 충분한 가치를 가질 수 있다.^{10,11)} 또한, 폐기물을 이용한 연료화는 회분량 발생, 폐기물 혼합에 따른 연도배기가스의 유해성, 고발열량 등의 문제가 해결되어야 연료로서 가치를 가질 수 있다.¹²⁾ 선행연구에서 하수슬러지를 단독연소 하는 경우는 연소재질의 견고성, 연소지속성, 발열량 등의 문제로 가연성물질을 혼합한 연료가 연소특성이 효과적이었고¹³⁾, RDF의 성형화 과정에서 발열량이 6,500 kcal/kg~7,500 kcal/kg 정도의 범위로 제조하여 연료의 혼합비율과 연소로를 제작하여 200℃ 이상의 승온 상태에서 적은 시료와 일정한 공연비의 조건에서 10분 간격의 연소시간의 변화에 따라 배연가스를 분석하여 연소특성을 조사한 연구결과 등이 발표되어진바 있다.¹⁴⁾ 본 연구는 온도조건과 공연비를 실질적인 소각시설의 연소상태를 적용하여 연구를 실행함에 따라서 연료화 장치시설이나 소각설비를 설계할 때 설계인자로 적용할 수 있는 연구가 실행되어져서 기존 연구와 차별성이 있다고 볼 수 있다. 또한 배출되는 배연가스 특성에 따라서 연소의 특성을 파악함으로써 연료를 연소할 때 배연가스 특성에 따라 운전인자를 평가할 수 연구가 실행되었다.

2. 실험 방법 및 연료화 실험

2.1 고품연료 제조 및 연소가스 분석방법

2.1.1 고품연료화 제조과정

고형화 연료제조 공정은 [Fig. 1]에 나타난 장치를 이용하였고, 제조과정에서 성형화를 위해서 10톤 압력과 성형 모형틀을 이용하여 시료 10g을 정량화하여 제조하였다. 일반폐기물과 유기성폐기물의 혼합에 따라서 제조된 시료는 [Fig. 2]에 나타내었다.

RDF의 제조를 위한 혼합 비율은 폐비닐·플라스틱 : 나무류 : 종이류 : 음식물쓰레기 : 하수슬러지를 5:1:2:2:2의 비율로 혼합하여 만든 연료(시료 S.1)와 5:3:0:2:2의 비율로 혼합한 연료(시료 S.2)를 성형장치를 이용하여 제조하였다. 제조된 연료화 시료는 24시간 자연건조 후 고위발열량의 실험적인 측정에서 0.5~0.8g의 무게의 범위에서 정확히 칭량하여 사용하였다.

연료성형장치에서 제조된 시료의 발열량은 [Fig. 3]에 나타낸 고위발열량(HHV)은 봄베식 단열소비 열량계(Adiabatic Bomb Calorimeter (Yoshida 제작, 1013-B)를 사용하여 측정하였다.

제조된 시료는 S.1과 S.2를 0.5~0.8g을 취하여 샘플을 셀에 담은 뒤 봄베에 넣고 밀봉한 뒤, 산소(순도 99.99%)를 압력이 3.45×10^6 Pa에 도달할 때까지 충전시킨 후, 전기적으로 샘플에 점화시켜 상승된 수온을 측정하여 분석하였다.

2.1.2 삼성분과 성분원소분석 실험

제조된 시료 중 삼성분 측정은 공해공정시험법에 의해서 일정한 시료를 채취하여 습윤 상태에서 무게를 측정하고, dry oven 속에서 $105^\circ\text{C} (\pm 5^\circ\text{C})$ 로 2시간 가열 후 24시간 데시케이터에 안정화하여 처리된 시료를 충분히 건조한 상태에서 건조무게를 측정하였다. 가연성 성분분석은 건조된 시료 20g이상을 채취하여 무게를 측정하였고, 3시간 동안 $600 \pm 25^\circ\text{C}$ 의 전기로에서 강열 감량한 후 무게측정을 통해서 분석하였다.

원소분석은 표준방식을 이용하여 사용된 시료 S.1

과 S.2의 샘플에서 C, H, O, N, S의 5개 항목을 dry base하에서 원소분석(모델명: Elemental Vario EL, Germany)은 이용하여 실행하였다.

2.1.3 고행연료의 연소특성 실험

RDF의 연소특성을 조사하기 위해서 Fig. 4에 나타낸 소형 연소장치를 이용하여 온도와 공기량을 조절하면서 시료의 최적주입량인 50g의 연료가 충분히 착화되어 연소가 진행되어져 승온 온도가 600°C 가 유지될 때부터 일정한 공기량이 자동적으로 주입되도록 조절하였다. 또한 일정한 공기량을 조절하여 온도는 승온 후 600°C 와 800°C 자동적으로 조절되도록 하여 시료가 완전 연소가 되는 10분의 연소시간으로 조절하여 실험을 실행하였다.

실험장치의 운전은 온도와 공기기를 조절하여 자동주입 되도록 하였고, 시료는 한번 주입하여 완전 연소될 때까지 운전하는 회분식으로 실험을 하였다.

연소로장치의 내부온도 측정은 연소로내의 부착된 센서에 의해서 온도가 자동적으로 조절되도록 하였다.



[Fig. 2] Manufacture refuse derived fuel.



[Fig. 1] Manufacture Apparatus of RDFs.



[Fig. 3] Adiabatic bomb calorimeter.

연소특성을 연구는 연도분석기(모델: ecom-KD)이 용하여 연속적으로 3, 6, 9분 단위로 배출되는 연도가스를 자동적으로 분석되도록 실험을 실행하였다.

가연성 폐기물과 유기성폐기물인 하수슬러지와 음식물폐기물을 혼합한 비율에 따라 제조된 연소과정에서 발생하는 연소특성을 나타내기 위해서 배연가스를 연도분석기(모델: ecom-KD)를 분석하였다.

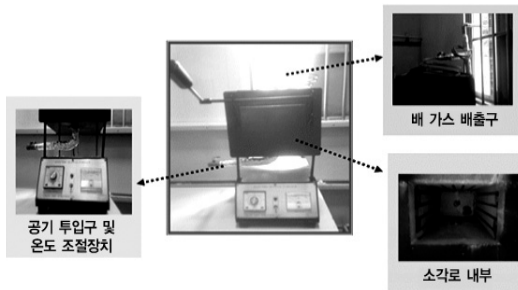
연소실험 장치에서 연소특성을 분석하기 위해 연소 조건은 시료 S.1과 S.2를 50g을 주입하여 공연비는 m 값이 1과 2의 조건에서에서 600℃와 800℃ 각각 최종 운전시간이 10분이 경과하는 동안 자동적으로 3분마다 배연가스가 측정되도록 하였다.

공기비 m값의 결정은 성형장치에서 제조된 시료 S.1과 S.2의 고발열량 값과 원소분석의 결과에 따라서 이론공기량을 계산하여 이론공기량 A_o에서 실제공기량은 이론공기량의 2배로 적용하여 공급하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고품화연료 제조특성 결과

RDF제조는 성형장치를 이용하여 하수슬러지와 소각 반입쓰레기를 혼합하여 만든 시료를 연소하여 발열량을 분석 결과 음식물 쓰레기와 혼합 소각하였을 때와 비슷한 발열량 결과가 나타났다. 연료제조를 위한 발열량 실측치는 최저 5,700 kcal에서 최대 7,711 kcal/kg으로 고품화연료로 활용하기에 적합한 6,000 kcal/kg 이상의 발열량이 넘는 재료를 선택하여 제조하였다. (나무류 폐비닐, 종이류의 혼합비가 2:4:2를 제외) 하수슬러지



[Fig. 4] Apparatus for combustion experiments of RDFs.

의 혼합비율을 높일수록 발열량은 증가하였다.

[Table 1]에 나타난 연구결과 따라서 연소실험에 사용된 시료 S.1(나무: 폐비닐·플라스틱: 종이류: 음식물쓰레기: 하수슬러지)의 혼합비율은 1:5:2:2로 제조하였고, S.2시료는 3:5:0:2:2로 혼합하여 제조하였다.

성형장치를 이용하여 제조된 고품화연료 S.1은 발열량이 6588.41 kcal/kg이었고, S.2는 7,452.8 kcal/kg로 나타났다. 삼성분 분석에서 S.1의 경우 수분 65.7%, 가연분 21.6%, 회분 12.7%로 나타났으며, S.2의 경우 수분 62.5%, 24.6% 및 회분 13.0%로 나타났다.

원소분석의 결과 S.1의 경우 C 46.5%, H 10.4%, N 9.2%, O 30.1%, S 3.4%, Cl 0.04%로 나타났으며, S.2의 경우 C 49.2%, 10.2%, 8.1%, O 30.1%, S 2.2% 및 Cl 0.2%로 나타났다.

고형화 연료 제조에서 음식물쓰레기와 하수슬러지 비율은 같은 조건에서 폐목의 비율이 높은 시료가 발열량이 높은 것으로 나타났다.

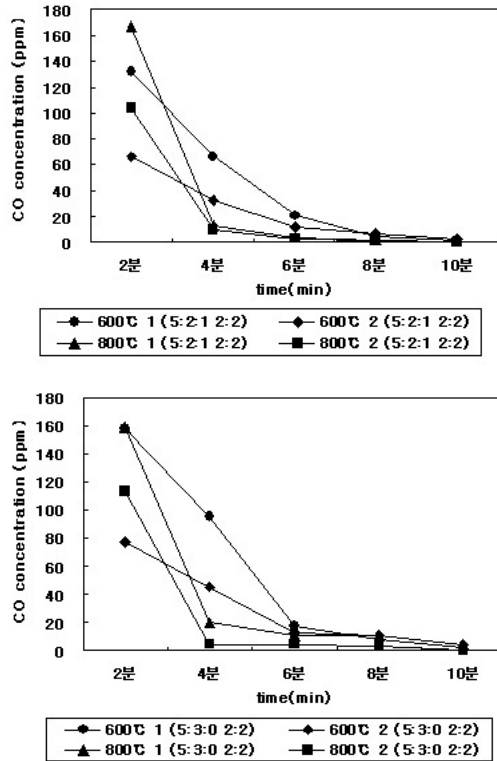
[Table. 1] Composition analysis of RDF (S.1 and S.2) after manufacture refuse derived fuel

	Rate of Mixing			Heat of combustion (kcal/ kg)			
	(Wood : Waste vinyl plastic : Waste paper)	Waste food	Sewage sludge				
S.1	1 : 5 : 2	2	2	6,588.41			
S.2	3 : 5 : 0	2	2	7,452.83			
Three-component				Proximate analysis			
S.1	65.7			Moisture(wt%)			
S.2	62.5			Moisture(wt%)			
S.1	21.6			Combustible material(%)			
S.2	24.6						
S.1	12.7			Ash(wt%)			
S.2	13.0						
Elemental composition							
	C	H	N	O	S	Cl	Ultimate analysis (wt%)
S.1	46.5	10.4	9.2	30.1	3.4	0.04	
S.2	49.2	10.2	8.1	30.1	2.2	0.2	

3.2 배연가스에 의한 연소특성

일반적으로 연소실험에서 연소특성은 대상물질의 성상이나 성분에 따라서 배출되는 연도가스 농도에 따라서 파악할 수 있으며, 배출되는 다양한 연도가스의 성분에 따라 다양한 가스제어 장치설계가 인자가 달라지고, 다양한 대기오염 방지시설이 필요로 하게 된다. 일산화탄소는 연소실에서 불완전연소 측도를 나타내는 인자로서 널리 알려져 왔고, 더 나아가 선형연구^{15,16)}에서 다이옥신생성과 일산화탄소 배출치와 선형적인 관련이 있다고 보고되고 있어 연소특성을 파악하는 과정에서는 CO발생의 연구가 RDF의 연소실험에서 중요한 실험적인 인자로 평가하게 된다. 선형연구에서 이미 하수슬러지의 단독연소에 비해서 혼소연소가 연소효율이 증가된다는 연구와 하수슬러지⁹⁾와 일반폐기물의 혼소에 의해 제조된 RDF의 연소조건이나 기초분석에 대한 연구가 진행되어졌다.^{10,11)} 본 연구는 선형연구를 바탕으로 도출된 연소특성을 평가할 수 있는 가연성폐기물과 음식물쓰레기 및 하수슬러지의 혼소에 따라 RDF의 성능을 실험하였다. 또한, 본 연구는 실제공기량의 조건에 따라 연소특성을 평가하기 위해서 배출되는 배연가스를 분석하는 실험이 실행되었다. 연소의 특성을 파악할 수 연소효율을 평가하는 인자는 공기량, 연소온도 및 연소시간에 따라 발생하는 유해물질의 배출여부를 판단할 수 있는 연구에서 선형연구의 결과물을 바탕으로 실질적인 연소시험이 진행되었다. [Fig. 5]와 [Fig. 6]의 결과는 연료제조 과정에서 발열량이 가장 높은 시료 S.2와 가장 낮은 시료 S.1을 사용하여 연소실험 장치에서 온도와 공기량을 변화하여 연소특성을 파악하기 위해서 CO와 CO₂를 분석하였다. 배연가스 분석은 600℃ 이상의 승온 상태에서 온도는 600℃와 800℃의 온도 조건일 때 공기량은 이론적으로 계산하여 공기비가 100%일 때와 200%일 때를 대비하여 연소실험을 실행한 결과이다. 시료 S.1의 경우 연소시간 2분이 경과하는 연소구간에서 건조와 건류가 실행되는 과정으로서 온도와 공기비에 따라 비례적이지 않았지만, 연소시간 4분이 경과하면서 연소상태가 최적조건인 연소분위기 나타냄으로써, 온도가 800℃와 공기비가 2일 때 7ppm으로 가장 낮은 농도로 발생하였다.

또한, 연소온도 600℃, 공기비 1일 때 CO가스는 75ppm으로 연소조건이 가장 나쁘게 나타났다.



[Fig. 5] Effect of combustion time on CO concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600℃ and 800℃ at m=1, 600℃ and 800℃ at m=2).

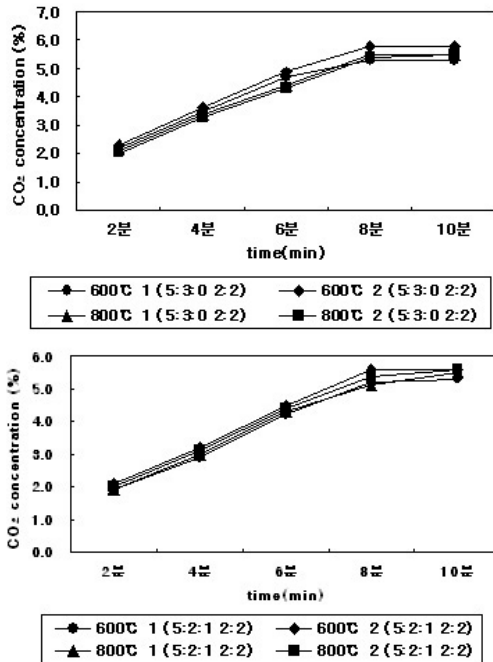
연소시간이 경과하며 따라 8분대를 지나면서 완전연소가 진행되었고, 연소온도 800℃와 공기비 2에서 CO농도가 2ppm으로 완전 연소가 실행되었음을 평가할 수 있었고, 연소시간 10분대에서 모든 실험조건에서 연소가 거의 진행되었다. 시료 S.2의 경우 발열량이 7,452.83 kcal/kg으로서 연소시간 2분이 경과하면서 CO의 발생량이 800℃와 공기비 2에서 가장 높게 농도가 발생되었고, 2분에서 4분대까지는 연소조건이 승온 후 건조와 건류단계로서 완전연소가 이루어지지 않았으나 4분이 경과하면서 가장 연소조건이 좋은 것으로 나타났고, 연소시간의 경과에 따라 CO농도가 가장 비

례적으로 낮아짐을 볼 수 있었다.

S.1과 S.2의 실험결과에 연소특성에 있어서 큰 차이 점은 없었으나, 종이류보다 폐목재류를 더 많이 혼합한 S.2의 시료가 연소시간 6분대에서 32ppm으로 낮아져 연소특성이 약간 우수한 것으로 나타났다. S.1과 S.2의 시료에 따라 연소특성을 측정할 결과 승온 후 초기 연소조건이 2분 정도에서 혼합비율에 따라 발열량이 낮은 시료 S.1이 CO발생량은 약간 높게 나타났지만, 연소시간이 경과한 후 6분 경과한 이후부터는 연소온도나 공기량에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

[Fig. 6]의 결과에서 보면 CO₂의 농도는 대상물이 산화 연소 후 발생하는 최종부산물로서 승온 후 2분에서 8분까지 연소시간이 경과함으로써, 비례적으로 감소함으로써 10분까지 거의 연소가 이루어지는 것으로 나타났다.

[Fig. 7]는 시료 S.1과 S.2의 시료 중 황의 함유량은 3.4%와 2.2%로 나타났으며, 연소시간에 따라서 승온 상태에서 연소시간 2분 후 SO_x의 발생량은 S.1의 시

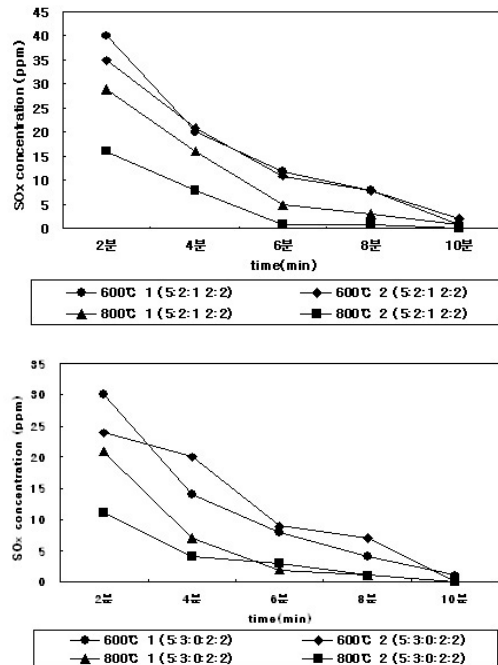


[Fig. 6] Effect of combustion time on CO₂ concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600°C and 800°C at m=1, 600°C and 800°C at m=2).

료가 S.2시료보다 각각 연소조건에 따라 5~10 ppm이 상 높게 나타났다

시료중의 황 함유량이 높은 시료가 연소의 초기상태에서 높게 나타났으나, 연소시간 6분이 경과한 후 정상적인 완전연소 조건에서는 연소온도와 공기비에 따라 SO₂발생량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 온도의 조건에 따른 영향은 S.1 시료의 경우 온도 800°C와 공기비 2일 때 연소시간에 따라 초기 2분대에서 17ppm으로 가장 낮게 나타났고, 온도 600°C와 공기비 1일 때 41ppm으로 가장 높게 발생하였다.

연소시간이 경과함에 따라 연소온도가 800°C와 공기비 2에서 연소시간 6분이 경과하면서 완전 연소조건을 형성하면서 10분이 경과한 후 SO₂농도는 0.5~2ppm을 유지하는 것으로 나타났고, 연소온도 600°C와 공기비 1에서 연소시간 6분이 경과한 후 SO₂농도가 16.5ppm, 연소가 마무리되는 10분이 경과하면서 3.5ppm으로 거의 비슷하게 발생하였다. 따라서



[Fig. 7] Effect of combustion time on SO_x concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600°C and 800°C at m=1, 600°C and 800°C at m=2).

SOx의 배연가스 발생량 분석에서 보면 시료의 혼합비율에 따라 연소가 불완전한 연소의 초기단계에서는 발생량이 S함유량에 따라 비례적으로 증가하였고, 연소 조건에 따라 연소온도 800℃와 공기량 2일 때가 가장 낮은 농도로 발생하였다. 따라서 SO₂농도의 발생은 완전연소로 인해서 생성되는 양이 적게 발생됨을 볼 수 있었다.

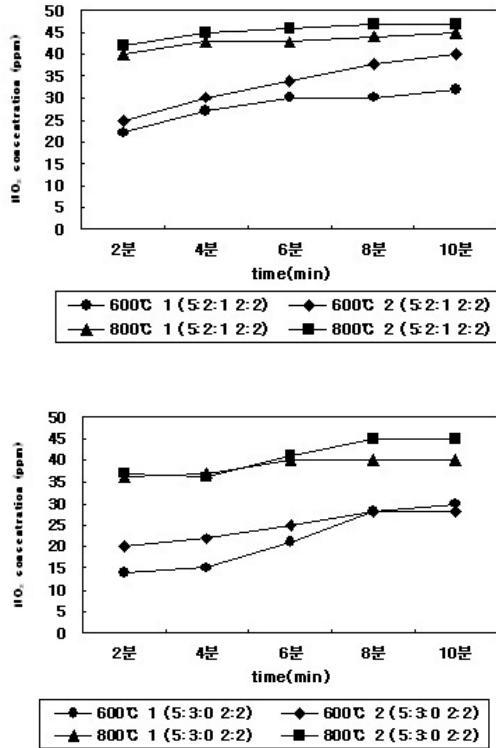
[Fig. 7]는 시료 S.1과 S.2의 시료 중 황의 함유량은 3.4%와 2.2%로 나타났으며, 연소시간에 경과에 따라서 승온 상태에서 2분 후 SOx의 발생량은 S.1의 시료가 S.2보다 각각 연소조건에 따라 5~10ppm이상 높게 나타났다.

시료중의 황 함유량이 높은 시료가 연소의 초기상태에서 높게 나타났으나, 연소시간 6분이 경과한 후 정상적인 완전연소 조건에서는 연소온도와 공기비에 따라 SO₂발생량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 온도의 조건에 따른 영향은 S.1 시료의 경우 온도 800℃와 공기비 2일 때 연소시간 경과에 따라서 초기 2분대에서 17ppm으로 가장 낮게 나타났고, 온도 600℃와 공기비 1일 때 41 ppm으로 가장 높게 발생하였다.

연소온도가 800℃와 공기비 2의 조건에서 연소시간 경과에 따른 SO₂발생량은 연소시간 6분이 경과하면서 완전 연소조건을 형성하였고, 10분대를 경과한 후 SO₂농도는 0.5~2ppm을 유지하는 것으로 나타났다. 연소 온도 600℃와 공기비 1의 조건에서 연소시간 경과에 따른 SO₂의 발생 농도는 6분이 경과한 후 16.5ppm, 10분이 경과하면서 3.5ppm으로 거의 비슷하게 발생하였다. 따라서 SOx의 배연가스 발생과 농도 분석에서 보면 시료의 혼합비율에 따라 연소상태가 불완전한 연소의 초기단계에서는 발생량이 시료내의 S함유량에 따라 비례적으로 증가하였고, 연소조건에 따라 연소온도 800℃와 공기량 2일 때가 가장 낮은 농도로 발생하였다. 따라서 SO₂농도의 발생은 완전연소로 인해서 생성되는 양이 적게 발생됨을 볼 수 있었다.

[Fig. 8]은 연도가스 NOx의 발생 농도를 조사하였다. NOx의 발생량은 공기량과 온도증가와 연료 속에 함유된 질소함량에 따라 발생에 영향을 미치는 연소특성을 나타내는 지표이다. 원소분석에서 S.1은 시료 중에 함

유된 N가 9.2%, S.2는 8.1%로 나타났으며, 연소 실험 결과에서 시료에 함유된 질소량에 따라서 NOx발생율이 비례적으로 높게 나타났다.

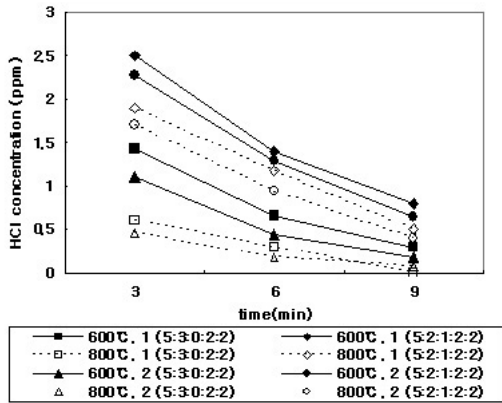


[Fig. 8] Effect of combustion time on NOx concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp.: 600℃ and 800℃ at m=1, 600℃ and 800℃ at m=2).

연소조건을 비교하여 조사한 결과 NOx농도는 온도 800℃와 공기비 2에서 가장 높게 나타났고, 연소시간에 따라서 NOx의 발생은 연소시간 4분을 경과하면서 큰 변화 없이 일정하게 나타났다. 연소조건과 공기비 1과 2로 실험한 결과에서 공기비보다는 연소온도가 NOx발생에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 연소시간 경과에 따라서 8분을 경과하면서 최적의 연소조건을 유지하였고, NOx발생 농도는 최대상태에서 일정하게 유지하는 것으로 나타났다.

3.3 유해가스 및 악취성분 결과

[Fig. 9]는 HCl가스의 분석결과를 나타내었다. HCl 가스는 연소과정에서 산소의 촉매 반응을 통해서 분진이나 금속촉매물질과 반응하여 다이옥신류를 발생시키는 전구물질로서 직접적으로 영향을 주는 인자이다.^{17,18)}



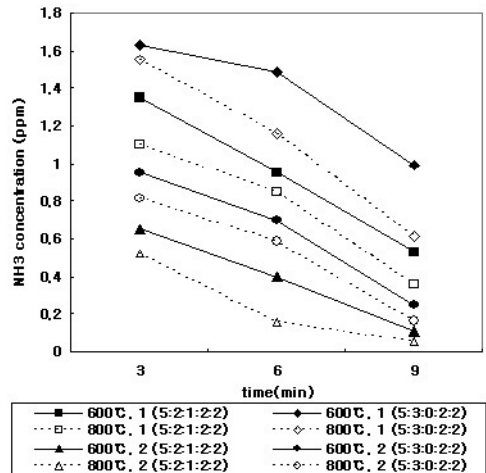
[Fig. 9] Effect of combustion time on HCl concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600°C and 800°C at m=1, 600°C and 800°C at m=2).

[Fig. 9]의 결과에서 보면 10분 동안 운전하여 3, 6, 9분 단위로 배출되는 HCl가스를 연속적으로 자동측정한 결과이다. HCl발생의 원인되는 시료에 함유된 Cl성분은 S.1의 시료 0.04와 S.2는 0.2%로서 연소시간 3분이 경과하여 승온 상태에 도달한 후 HCl의 배출농도를 분석한 결과 시료 S.1이 S.2보다 농도가 높게 발생되는 것으로 나타났다.

다양한 연소조건의 실험결과에서 보면 연소온도 800°C에서 발생농도가 가장 낮게 나타났으며, 동일한 온도조건에서 공기비가 1보다 2의 조건이 더 효과적인 연소조건을 형성함으로써 HCl의 발생농도가 낮게 나타났다. 연소조건인 온도가 800°C와 공기비 2일 때 연소시간이 9분이 경과한 후 배출가스를 측정할 결과 0.03 ppm으로 거의 발생하지 않는 것으로 나타났고,

이때의 연소조건이 가장 효과적인 연소특성을 갖는 것으로 나타났다. 가연성폐기물과 유기성폐기물의 연료화 사용을 높이기 위해서 유기성폐기물인 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼재비율을 높이는 경우에는 연소과정에서 암모니아나 황화수소가 대표적으로 악취물질로 발생하는 원인이 된다. 혼재비율에 따라서 시료 S.1의 경우 발열량이 6,588.41 kcal/kg이었고, 시료 S.2의 경우는 7,452.83 kcal/kg으로 나타났다.

[Fig. 10]의 결과에서 악취성분인 NH₃의 발생은 시료의 혼재비율과 온도조건보다는 공기비 2일 때 연소시간 3분을 경과한 후에 가장 낮게 나타났으며, 온도조건 보다는 공기비가 NH₃의 생성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 연소시간 증가에 따라 NH₃는 연소시간이 9분이 경과한 후 비례적으로 감소하는 것으로 나타났다.



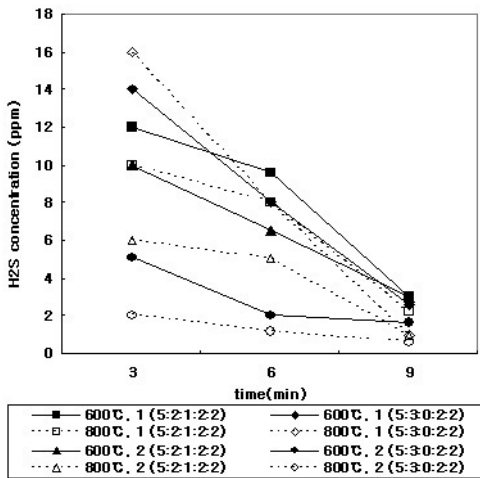
[Fig. 10] Effect of combustion time on NH concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600°C and 800°C at m=1, 600°C and 800°C at m=2).

[Fig. 11]에 나타낸 실험결과는 가연성폐기물에 음식물폐기물과 하수슬러지 비율을 일정하게 혼합한 후 연소조건에 따라 연소가스 중 H₂S를 측정할 결과 S.1의 경우 황 함유량이 3.4%, S.2의 시료는 2.2%를 함유하

였다.

연소조건에서 시료에 함유량에 따른 실험결과에서 황함유량이 적은 S.2의 경우가 S.1시료보다 연소시간 3분을 경과한 후 H₂S농도가 낮게 나타났다. 연소조건이 공기량과 온도조건에 미치는 영향을 분석한 결과 온도가 600℃와 800℃에서 온도조건보다 공기량이 1인 경우보다 2일 때 낮게 나타났다.

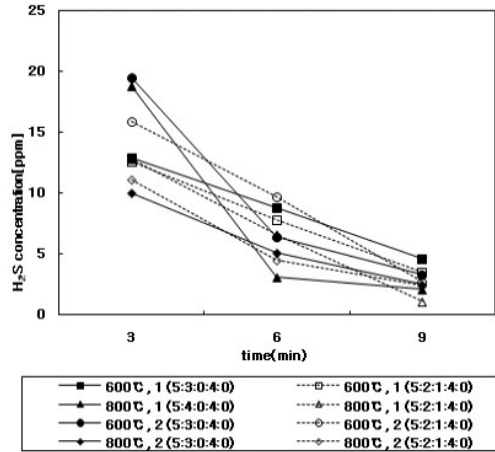
본 연구결과에서 승온 상태에서 연소온도 600℃이상에서 연소온도보다는 공기 공급량에 따라 발생량이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 시료에 S의 함유량에 따라 H₂S배출량이 큰 것으로 나타났다. 연소시간의 증가에 따라서 공기량과 연소온도 변화에 따라 비례적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 연소시간이 끝나는 9분대에서 2~4ppm으로 완전연소가 이루어지는 경우는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.



[Fig. 11] Effect of combustion time on H₂S concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600℃ and 800℃ at m=1, 600℃ and 800℃ at m=2)

[Fig. 11]의 결과에서 하수슬러지와 음식물쓰레기 일정하게 혼합하여 RDF로 성형하여 연료로 제조하였고, RDF의 성형장치에서 제조하는 과정에서 유기성폐기물인 음식물쓰레기와 하수슬러지 혼재비율에 따라 연

소과정에서 H₂S농도의 발생과정에 대한 영향을 [Fig. 12]에 나타내었다.



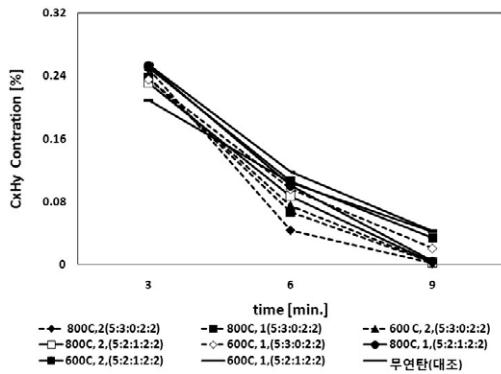
[Fig. 12] Effect of combustion time on H₂S concentration in flue gas of waste food and sewage sludge (reaction temp.:600℃ and 800℃ at m=1, 600℃ and 800℃ at m=2).

[Fig. 11]의 결과에서 음식물쓰레기와 하수슬러지의 1:1의 일정한 비율로 혼재한 시료보다는 유기성폐기물인 각각 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼재하지 않고 독립적으로 전체 혼재비율 중 4의 비율로 제조한 시료를 연소실험 결과 초기 3분을 경과한 후 H₂S가 2배 이상 높게 나타났다. 본 연구에서 유기성폐기물의 혼재에 있어서 악취성분인 H₂S는 각각 전체 혼재비율 중 음식물쓰레기와 슬러지의 비율이 높은 시료인 경우 발생농도가 높게 발생하는 것으로 나타났다.

[Fig. 13]는 유해가스의 발생 원인이 될 수 있는 탄화수소계열의 전체 가스 량을 분석하였다. 탄수소계열의 가스발생량을 비교할 수 있는 대조군은 무연탄을 사용하여 연소특성을 조사하였고, S.1과 S.2시료의 연소과정에 의해서 발생하는 C_xH_y농도를 대조군과 비교하여 분석하였다.

연소실험에서 연소시간이 3분 경과한 후 무연탄에서 발생하는 C_xH_y의 농도가 가장 낮게 나타났지만, 연소시간이 9분이 경과한 후 연소조건인 온도 800℃와

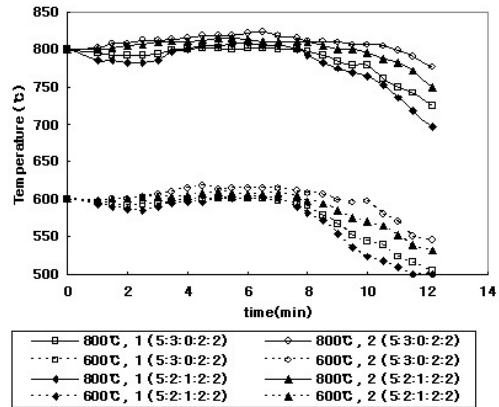
공기비 2인 경우가 가장 낮게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 제조된 시료가 연소되는 경우 CxHy의 배출 농도는 연소온도, 공기량의 조건이 완전연소가 이루어지는 연소실험에서 대조군인 무연탄과 비슷하게 나타나 제조된 시료가 연료로서 충분한 것으로 나타났다.



[Fig. 13] Effect of combustion time on CxHy concentration in flue gas of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600°C and 800°C at m=1, 600°C and 800°C at m=2).

3.4 연소장치 내부 온도변화

[Fig. 14]의 결과는 실험조건에 따라 가연성물질과 유기성폐기물 혼합에 따라 성형장치에서 제조된 연료를 연소하는 동안 연소시간은 10분이 연소가 연속적으로 이루어지는 동안 온도변화를 자동적으로 분석하였다. 연소장치의 내부온도 변화는 연료종류, 과잉공급량, 불완전연소 및 연소가 끝나는 지점에서 온도가 하강하게 [Fig. 14]의 결과에서 보면 연소온도 800°C와 공기비 2의 연소시간이 8분이 경과한 후 800°C이상의 온도를 유지하다가 연료의 연소가 끝나는 시간에서 온도가 하강하기 시작하였고, 연소온도 800°C와 공기비 1의 조건에서는 800°C보다 약간 낮은 온도를 유지하다가 연소시간이 4분을 경과한 후 완전연소 조건의 분위기를 유지하는 8분대까지는 800°C을 유지한 후 10분이 경과한 후 연소가 마무리되면서 온도가 700°C까지 급강하는 것으로 나타났다.



[Fig. 14] Temperature profiles of combustion reactor of S.1 and S.2 (reaction temp. : 600°C and 800°C at m=1, 600°C and 800°C at m=2).

본 연구에서는 시료 S.1과 S.2의 연소과정에서 발열량이 높은 S.2의 시료가 S.1보다 내부온도 유지가 안정하게 유지되었다. 연소온도 같은 조건에서 공기비 2의 조건이 1의 조건보다 내부온도가 안정하게 유지되는 것은 공기비 2의 공기공급량이 시료를 연소하는 과정에서 가장 효과적인 연소특성을 나타내었다.

4. 결론

하수슬러지, 음식물쓰레기 및 발열량이 높은 가연성쓰레기의 혼합비율에 따른 고품화연료로 제조된 시료를 대상으로 연소실험 장치에서 다양한 연소조건에 따라서 연도배기가스를 분석하여 연소의 특성을 파악하였다.

CO 배연가스의 분석의 결과 발열량 높은 시료가 연소효율의 증가에 따라 낮게 발생하였고, 연소실험에서 800°C의 온도와 공기비 2의 조건이 가장 낮은 CO농도가 발생하였다.

CO₂농도는 연소 대상물이 산화 연소되어 분해되는 최종부산물로서 발생하는 배연가스로서 승온 후 완전연소 상태에서는 연소시간 경과에 따라 비슷한 경향을 보였고, 완전연소 상태에 도달하는 8분에서 10분대에

최대로 발생하였다.

SO_x의 발생은 연료에 함유한 S성분 높은 시료인 경우와 연소조건인 경우는 연소온도 800℃와 공기비 2의 상태에서 가장 낮은 SO_x가 발생하였다.

NO_x는 연료 속에 함유된 N성분이 높은 시료가 높게 발생하였고, 연소조건 경우는 연소온도가 높고, 공급되는 공기량이 높은 경우 상대적으로 높게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 동일한 시료와 일정한 공기비에서는 온도가 800℃일 때가 NO_x 발생이 높게 나타났다.

HCl가스는 연소과정에서 산소의 촉매 반응을 통해서 분진이나 금속촉매물질과 반응하여 다이옥신류를 발생시키는 잔류물질로서 작용하는 배연가스의 인자로서 분석되었고 사료에 함유한 Cl성분이 높은 경우와 연소조건인 경우 온도가 800℃와 공기비가 2일 때가 가장 낮은 HCl의 농도가 낮게 발생되었다.

악취성분인 NH₃의 경우는 연소조건이 시료의 혼합 비율과 온도조건보다는 공기비가 높은 경우가 발생에 큰 영향을 미쳤고, 온도시간에 있어서 연소가 시작되어 승온 되기 전까지 높게 발생하는 것으로 나타났다.

H₂S의 농도발생은 시료의 황 함유량이 높은 경우와 하수슬러지나 음식물쓰레기 혼합 비율은 높은 경우 높게 나타났다. 일정한 시료를 주입한 조건에서 연소온도보다는 공기량이 높은 경우가 낮게 발생하는 것으로 나타났다.

연소실험에서 혼합비율에 따라서 제조된 S.1과 S.2의 시료를 연소한 결과 C_xH_y농도무연탄 연소시 발생하는 농도와 비슷하게 나타나 제조한 연료는 보조연료 및 주 연료로서 가치가 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

- 이호태, 진경태, 이인철, "하폐수 슬러지의 에너지 자원화 기술개발 동향", 대한폐기물학회지, 11(4), pp. 70~79 (2003).
- 환경부, "2005년 전국 폐기물발생 및 처리현황", 행정간행물 (2005).
- 이호태, "하폐수슬러지발생", 처리 및 자원화 기술 현황" 월간폐기물, 10, pp. 20~36 (2000).
- 이동규 외 "하수슬러지와 폐기물 고품연료의 혼합연소 특성", 한국폐기물학회지, 22(6), pp. 533~540 (2005).
- 신병철, 이조영, 최형욱, "폐기물 고품연료(RDF)의 활용방안 및 전망", 고분자과학기술, 13(3), pp. 307~314 (2002).
- 홍상연 외 "음식물찌꺼기를 이용한 RDF로의 자원화 가능성에 관한 연구", 한국폐기물학회, 26(3), pp. 252~262 (2009).
- 김석준 외, "폐기물 고품연료(RDF)의 국내의 기술동향", 월간폐기물, 13, pp. 45~50(2003).
- 하상안, "부산시 생활쓰레기 및 유기성폐기물 연료화와 재생에너지연구", 부산지역환경 기술개발센터 최종보고서, pp. 15~18 (2008).
- 이동규 외, "하수슬러지와 폐기물 고품연료 (RDF)의 혼합 연소 특성", 한국폐기물학회, 22(6). pp. 45~50 (2005).
- Piao, G., Aono, S., Mori, S., Deguchi, S., Y., Kondoh, M., "Combustion test of refused derived fuel in fluidized bed", Waste Management, 21, pp. 427~434 (2000).
- Piao, G., Aono, S., Kondoh, M., Yamazaki, R. and Mori, S., "Combustion test of refused derived fuel in fluidized bed", Waste Management, 20, pp. 443~447 (2000).
- Liu, G.Q., Itaya, Y., Yamazaki, R., Mori, S., Yamaguchi, M. and Kondoh, M., "Fundamental study of the behavior of chlorine during the combustion of single RDF", Waste Management, 21, pp. 427~433 (2001).
- Lee, D. G., Lee, J. S., Kwak, H. and Bae, S. Y., "Co-combustion characteristics of sewage sludge and RDF, ministry of commerce", Industry and Energy, Final, Report. pp. 25~36 (2004).
- Ogata, T. and Werther, J., "Combustion characteristics of wet sludge a fluidized bed", Fuel, Res. 75(5), pp. 617~626 (1996).

15. Kaune, A., Lenoir, D., Nikolai, U., Kettrup, A., "Estimating concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dibenzofurans in the stack gas of a hazardous waste incinerator from concentrations of chlorinated in the stack gas of a hazardous waste incinerator from concentrations of chlorinated benzenes and biphenyls", *Chemosphere*, 29(9), pp. 2083~2096 (1994).
16. Kilgroe, A., Nikolai, U., Kettrup, A., "Development of good combustion practice for municipal waste combustors", proceedings of the 15th National waste processing conference, Michigan, 17-20, pp. 145~156 (1992).
17. Canins, P.W., Eduljee, G.H., "Polychlorinated Dibenz-p-dioxins and Dibenzofurans Formation in incineration", *Environ. Sci. Technol.*, 31(2), pp. 776~785 (1997).
18. Cains, P.W., Eduljee, G.H., "Prediction of PCDD and PCDF emissions from municipal solid waste (MSW) incinerators", *Chemosphere*, 34(1), pp. 51~69 (1997). 