

생활 폐기물의 열분해 연료화

심성훈*, 김석준*, 김우현*, 길상인*, 윤진한*, 홍성훈**, 백익현***

*한국기계연구원, **(주)대우건설, ***한라산업개발(주)

Carbonization of Municipal Wastes

S. H. Shim*, S. J. Kim*, W. H. Kim*, S. I. Keel*, J. H. Yun*,

S. H. Hong**, I. H. Baek***

*Korea Institute of Machinery & Materials, **Daewoo E & C Co., Ltd.,

***Halla Eng. & Indust. Develop. Co., Ltd.

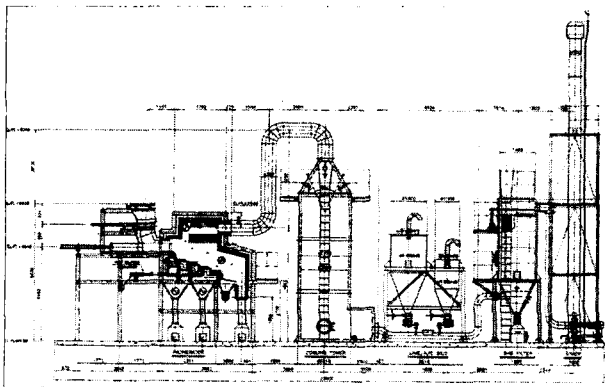
1. 서론

열분해를 이용한 폐기물의 처리가 여러 유해물질을 저감시킬 수 있다는 기대감으로 국내에서도 열분해를 이용한 폐기물 처리 관련 연구가 많이 진행되고 있다.^{1,2)} 아울러 폐기물을 열분해한 후에 산소를 공급하여 가스화와 동시에 잔재를 용융시키는 열분해 가스화 용융³⁾이나 예열공기와 혼합하여 고온으로 연소시키면서 잔재를 용융하는 열분해 연소 용융⁴⁾ 등의 방식이 개발되면서 다이옥신과 소각재의 발생을 차단하는, 환경적으로는 제로 에미션(zero-emission)에 근접하는 기술에 대한 관심도 높아지고 있다. 한편, 폐기물을 에너지 자원이라는 측면에서 보면 폐기물에 포함되어 있는 유기물은 열분해를 통해 석탄에 버금가는 훌륭한 에너지원으로 전환될 수 있다. 본 연구에서는 국내 도시에서 발생하는 생활 폐기물을 대상으로 열분해를 적용하여 회수되는 물질에 대한 분석을 시도함으로써 연료로서의 가치를 확인하고자 하였다. 본 연구에 사용된 열분해 장치는 생활 폐기물 100 kg/hr급으로써 폐기물을 열분해하여 이를 다시 고온으로 연소시키는 열분해 용융 시스템의 일부이다. 폐기물의 일부를 부족공기로 연소시키는 부분산화방식을 이용하여 열분해하는 가동 그레이트(grate) 방식이며, 본 고에는 실험 결과 중의 일부를 게재하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

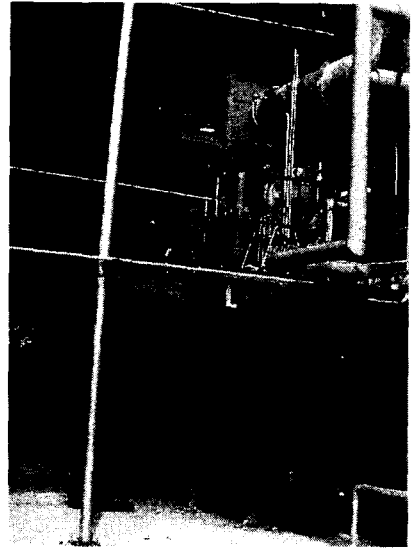
2.1 실험장치

한국기계연구원에 설치되어 있는 열분해 용융 시스템은 [그림 1]과 같다. 공기의 유입 차단을 위해 2중 게이트(gate)의 투입구를 가지는 가동 그레이트 방식의 열분해로가 제일 좌측에 위치해 있다. 투입된 폐기물은 그레이트에 의해 이송되면서 이론 공기량보다 적게 공급되는 부족공기에 의해 저온의 화염이 형성되는 부분산화방식의 화염열분해(flaming pyrolysis)를 수행한다. 열분해에 의해 생성되는 찌(char)는 그레이트 최종단에 위치한 진동식 선별기에서 대형의 불연물과 분리되며 선별된 찌는 스크류 피더에 의해 용융로로 공급되어 고온으로 연소된다. 열분해 과정에서 발생한 가연



[그림 1] 100 kg/hr 열분해 용융 시스템 구성도

성 가스를 연소시키는 연소실은 열분해로의 상부에 배치하여 고온의 복사열을 열분해로에 전달하여 열분해에 필요한 열을 보충하도록 되어 있다. 용융로에서 발생한 고온의 배가스는 연소용 공기와 열교환한 후에 열분해로의 하부로 유입되어 열분해와 가스화에 사용된다. 이 용융로 배가스 중의 산소량을 조절함으로써 열분해로 하부의 화염 강도를 제어할 수 있다. 열분해로의 하부는 폐기물이 대부분 열분해되어 활성이 높은 고체상의 탄화물 상태이므로 용융로의 배가스 중에 포함되어 있는 CO₂ 및 H₂O와 반응하여 CO, H₂ 등의 가연성 가스를 합성한다. 이 가스는 다시 상부의 연소로에서 완전히 연소된 후에 열교환기나 병렬로 설치되어 있는 급냉탑을 거치면서 냉각된다. 냉각된 배가스는 활성탄과 소석회 분말이 공급되는 건식 세정기를 거쳐 백필터에서 분진을 제거하고 유인송풍기를 통해 연돌로 배출된다. [그림 2]에 제작 설치된 열분해로의 전경을 게재하였다.



[그림 2] 열분해로 전경

2.2 실험방법

실험에 사용된 폐기물은 실험 결과에 대한 정확한 경향을 파악하기 위해 다음 <표 1>과 같은 조성으로 혼합하여 제조하였다. 국내 생활 폐기물의 발열량은 지역과 계절에 따라 변화가 크며, 최근에 들어서는 음식물 쓰레기가 분리 수거되고 함수율이 낮아짐에 따라 발열량이 높아지는 추세에 있다. 본 고에서는 <표 1>에서 나타낸 바와 같이 함수율이 30% 및 40%로 비교적 낮고 발열량이 높은 경우에 대하여 실험한 결과를 게재한다. 이미 이전 실험에서의 함수율이 50% 이상이고 발열량이 2,000 kcal/kg이하인 경우와 비교하여 보면 이와 같이 함수율이 낮고 발열량이 높아지게 되면 열분해로의 온도가 상승하며 따라서, 소량의 공기에도 화염이 활발해지고 회분 화율이 증가하게 된다. 즉, 열분해를 통해 생성되는 좌의 발열량을 높이고자 하는 목적에 부정적인 영향을 미칠 수가 있으므로 회분화율의 저감에 초점을 맞추어 실험하였다. 본 실험에서는 열분해로에 별도로 공급하는 공기를 차단하고 용융로의 배가스에 함유된 산소를 이용하여 열분해로의 화염과 온도를 조절하였다.

<표 1> 실험 대상 폐기물

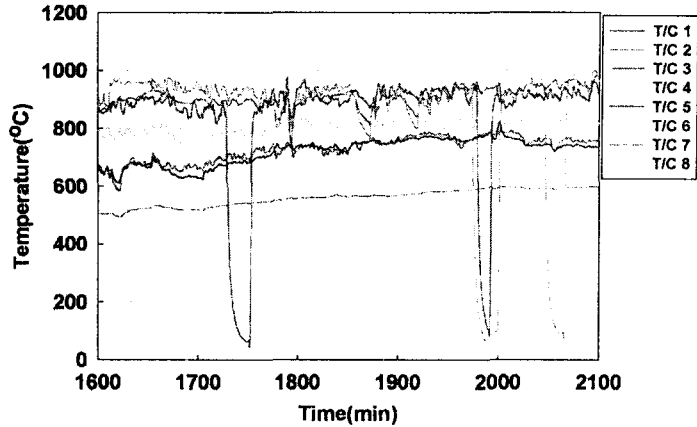
항 목		시료#1	시료#2	비고
건량물리 조성 (wt%)	주방쓰레기	10	10	건량 중 수소 함유량 (wt%) 6.3%
	종이류	45	45	
	플라스틱류	25	25	
	목재류	20	20	
	계	100	100	
함수율(wt%)		30	40	
건기준 고위발열량(kcal/kg)		5,050	5,050	
저위 발열량(kcal/kg)		3,015	2,450	

3. 실험 결과

3.1 온도 특성

열분해로와 연소로의 각부 온도를 측정된 결과는 [그림 3]과 같다. 이 그림에서 1980분대까지는 <표 1>의 시료 #1, 즉 함수율 30%의 폐기물을 대상으로 실험한 결과이며, 그 이후는 시료 #2, 함수율 40%의 폐기물을 대상으로 실험한 결과이다. 이 결과에서 알 수 있는 바와 같이 온도 측정의 결과에서는 함수율의 변화에 따른 큰 차이를 확인하기는 어렵다. 다만

열분해로 중, 상부의 온도의 T/C 5, 7의 온도가 다소 하강하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 즉, 폐기물의 투입부에서의 온도에 발열량과 함수율이 영향을 미치는 것으로 보인다. 그러나, 전반적으로 운전에 영향을 미칠만한 변화는 발생하지 않았다. 그림에서 연소로 입구 온도 T/C 3과 연소로 출구 온도 T/C 8의 온도에서 급강하한 부분은



[그림 3] 열분해로 및 연소로 온도 측정 결과
(T/C 1-3 : 연소로, T/C 4-7 : 열분해로, T/C 8 : 연소로 출구,
1600-1980min. : 함수율 30%, 1980-2100min. : 함수율 40%)

위해 열전대를 제거한 시간대를 나타낸다. 열분해로에서 가장 중요한 온도는 T/C 6의 열분해로 하부 벽면 근처의 온도이다. 이 부분은 용융로에서 배가스가 유입되는 위치이기도 하다. 용융로에서 유입되는 배가스의 온도는 약 400°C로 높지 않으나, 이 배가스 중에는 CO₂, H₂O와 산소가 함유되어 있으므로 열분해 생성물인 촉와 반응하여 합성가스를 생성하며, 이 합성가스는 다시 산소와 결합하여 투명한 청염의 불꽃을 내면서 연소하기도 한다. 즉, 용융로 배가스 중의 산소 농도를 조절함으로써 열분해로 하부의 온도를 조절할 수 있으며, 따라서, 탄화물과 함께 중요한 인자인 고형 탄화물의 분쇄성을 높일 수 있는 것이다. 일반적으로 열분해된 고형의 탄화물은 점착성이 높은 타르가 함유되어 있으므로 이를 크래킹(cracking)하지 않으면 잘게 부서지지 않아 진동 선별기에서의 분리성을 나쁘게 하므로 열분해로 하부에서 적절한 온도를 유지시켜 주는 것은 매우 중요하다. 열분해로 하부 T/C 6의 온도는 590°C 부근에서 안정되었으며, T/C 5, 7이 나타내는 열분해로 중·상부의 온도는 아직 부분 연소 화염이 활발한 영역으로 740~750°C 부근에서 안정되었다. 합성가스가 연소되는 연소로의 온도는 보조 버너가 정지된 상태에서 950~1000°C를 유지하였다.

3.2 열분해 생성물의 분석

열분해로에서의 고형과 가스상 생성물을 채취하여 분석한 결과를 <표 2>와 <표 3>에 게재하였다. 고형의 생성물은 육안으로 보아 거의 회분이 없는 촉의 형태로 배출되었으며 특히 목재류는 내부까지 잘 탄화되어 그 상태가 매우 양호하였다. 그러나, 간혹 책과 같이 종이류가 고밀도로 겹쳐진 부분은 완전히 탄화되지 않은 채로 배출되는 부분도 나타났다. 이 고형의 탄화물에 대하여 삼성분과 발열량을 분석한 결과를 보면 가연분이 함수율 30%의 폐기물에서 평균 65.09%, 40%의 폐기물에서 70.80%로 함수율이 높은 쪽이 가연분이 더 많게 나타났다. 발열량도 같은 경향을 보이는데 이는 함수율이 높은 폐기물이 상대적으로 화염 온도가 낮고, 연소상태로 활성화되는 경향이 감소하기 때문인 것으로 적당한 함수율은 고형 탄화물의 생성에 유리한 것으로 판단된다. 발열량 분석 결과에서 나타난 바와 같이 평균 4,400 kcal/kg 정도로 거의 양질의 석탄에 버금가는 발열량을 가진다. 즉, 이러한 폐기물의 열분해 생성 고형물은 열량의 측면에서 불 때 충분한 재생 에너지 자원이 될 수 있음을 알 수 있다.

다음 열분해로에서 배출되는 가스를 분석한 <표 3>의 결과를 보면 열분해 과정에서 저열량의 합성가스가 생성됨을 알 수 있다. 부분 연소를 이용한 열분해이므로 합성가스의 발열량은 매우 낮아 별도의 에너지 자원으로

이용하기는 곤란하나, 열분해 과정에서 발생한 미연분이나 유해성 물질을 고온으로 산화시키는 데에는 무리가 없다. 가스 중의 가연성분과 산소 농도의 관계에서 알 수 있는 바와 같이, 폐기물 시료 #2의 열분해 가스 중에 산소의 농도가 높아 가연성분이 연소를 통해 많이 소모되었음을 유추할 수 있다. 본 연구에서 탄

화물은 고온으로 연소시켜 회분을 용융 유리화(vitrification)시키는 것이 목적이므로 합성가스는 연소로 출구 온도를 850℃ 이상으로 유지시킬 수 있는 정도의 열량만 가지면 된다. 합성가스의 열량이 높아지면 상대적으로 고형분 중의 탄소성분이 가스화 반응에 많이 소모된 결과이므로 회분화율이 높아지게 된다.

4. 결론

100 kg/hr급의 가동 그레이트형 열분해로를 이용하여 함수율이 낮고 발열량이 높은 종류의 생활 폐기물을 부분 연소 방식의 열분해를 통해 탄화율이 높은 고형 생성물을 얻을 수 있는 온도 및 운전 조건을 확보할 수 있었으며, 열분해 및 가스화 과정에서 발생하는 합성가스의 분석을 통해 가연 성분의 변화 경향을 파악할 수 있었다. 추후 지속적인 연구를 통해 보다 진전된 자료를 얻을 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 환경부에서 시행하는 차세대 핵심 환경기술 개발사업의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부임을 알려드리며 관계자 여러분께 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 심성훈 외, 생활 폐기물 열분해 용융을 위한 열분해 기술 연구, 한국열분해용융공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 19-28 (2002)
2. 이진욱, 심성훈, 김석준, 열분해실 및 연소실 유동해석과 기본설계에의 응용, 한국에너지공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 85-90 (2002)
3. 유명돈 외, 고상 및 액상 폐기물에 대한 가스화 용융 특성 연구, 한국열분해용융공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 53-60 (2002)
4. 심성훈 외, 폐기물의 균질탄화 및 가스화 이용한 잔재용융 안정화 방식의 화염열분해 소각 시스템 개발, 산업자원부 보고서 (2001)

<표 2 > 열분해 고형 생성물 분석 결과

시료	항목	가연분 (%)	회분 (%)	수분 (%)	고위발열량 (kcal/kg)	저위발열량 (kcal/kg)
#1	1	59.32	34.84	5.83	3481.1	3446.2
	2	70.86	24.84	4.31	5373.5	5347.7
	평균	65.09	29.84	5.07	4427.3	4397.0
#2	1	71.00	23.40	5.59	4282.4	4248.8
	2	70.60	28.53	0.87	4650.6	4645.4
	평균	70.80	25.97	3.23	4466.5	4447.1

<표 3 > 열분해 가스 분석 결과

시료	성분 (%)	H ₂	O ₂	CO	CH ₄	저위발열량 (kcal/Nm ³)
#1	1	2.54	1.37	4.88	1.31	326
	2	1.48	1.73	2.77	0.98	206
	3	1.71	2.76	3.26	0.92	227
	평균	1.91	1.95	3.64	1.07	253
#2	1	0.30	6.95	0.51	0.12	34
	2	0.52	5.97	0.80	0.20	55
	3	1.18	4.09	1.98	0.56	139
	평균	0.67	5.67	1.10	0.29	76