



## 생활쓰레기의 이화학적 특성 및 연소 속도론적 연구

이견주<sup>†</sup>

상지대학교 환경공학과

(2007년 1월 16일 접수, 2007년 2월 5일 채택)

## Study on Physico-chemical Characteristics and Combustion kinetics Solid Waste

Keon Joo Lee<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Sangji university, wonju, Korea

### ABSTRACT

In this study the physico-chemical characteristics of solid waste and the thermogravimetric analysis of waste were investigated. It is helpful to make the basic data for waste thermal treatment system. It was found that the combustible component, water and ash were 61%, 32%, 7% respectively. The amount of combustible component was much higher than those of others. It was shown that the total carbon and hydrogen of the waste was 94% and the high heating value was 2897.883(Kcal/kg). The thermogravimetric analysis showed that the weight loss of wastes occurred as temperature increased, and the rate was higher in the the temperature range of 30 0°C to 500°C

Keywords : thermogravimetric analysis, high heating value, element analysis, kinetics

### 초 록

본 연구는 생활쓰레기의 물리·화학적 분석 및 발열량 등으로 그 특성을 알고 반응기를 이용한 열중량감량 분석을 함으로써 열처리 시설의 가장 효율적인 운영에 기초자료가 됨을 목적으로 한다. 측정 결과는 다음과 같다. 쓰레기의 삼성분 중 가연분이 약 61%로 다른 수분(약 32%) 회분(약 7%)보다 함유량이 높았고 쓰레기의 원소분석결과 종류에 관계없이 탄소와 수소(약 94%)의 존재량이 대부분이었다. 쓰레기의 발열량 분석 결과 고위발열량은 2897.883(Kcal/kg)의 값을 갖는 것으로 나타났다. TGA를 이용하여 도시생활쓰레기의 종류별 열적 특성을 분석한 결과 온도가 증가함에 따라서 시료 중에 함유된 휘발분이 지속적으로 무

<sup>†</sup>Corresponding author (kjoolee@sangji.ac.kr)

게 감량이 일어났으며 특히 300~500°C에서 열중량감량이 활발히 진행되고 그 반응속도에 차이가 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 열중량분석, 발열량, 원소분석, 반응속도

## 1. 서론

우리나라 쓰레기 정책은 발생량 자체를 줄일 수 있는 감량화가 우선 목표이며 다음은 발생한 쓰레기를 최대한 재활용하는 것이고 최종적으로 소각 또는 매립하는 것을 우선순위로 정하고 있다. 쓰레기를 매립할 경우에는 국토 잠식뿐만 아니라 침출수 등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 일정 비율까지는 소각을 계속 확대할 필요가 있다.

환경부는 앞으로 쓰레기의 발생량 자체를 우선적으로 줄이고 발생한 쓰레기는 최대한 자원화 하여 재활용하며, 처리가 불가피한 쓰레기는 환경적으로 안전하고 위생적으로 처리하는 '자원 순환형 쓰레기 관리체계'를 정착시켜 나가고자 2002년 3월에 '제2차 국가폐기물종합계획'을 확정한다.

52,743톤/일로 예상되는 2011년의 생활쓰레기 발생량을 12% 줄이고 매립 또는 소각 처리해야 할 쓰레기는 2002년의 27,953톤/일 보다 22% 적은 21,817톤까지 감축하며, 재활용기반 시설의 확충과 재활용기술 개발 및 재활용산업 육성 등에 총 1조 3,000억을 집중적으로 투자하여 재활용률을 2011년까지 53%로 높여 나가고자 한다.

생활쓰레기의 소각 처리율을 30%로 높이기 위해 약 1조 1,000억 원을 시설확충에 투자하고 매립은 17% 수준까지 낮추어 나가며, 사업장 쓰레기는 예상 발생량의 8%를 줄이는 동시에 재활용률은 80%로 높일 계획이다.

따라서 도시생활쓰레기의 소각처리에 비중이 높아질 지금 쓰레기의 물리·화학적 성분의 분석은 필요하다. 이 자료를 이용하여 소각처리 적용 및 퇴비화의 타당성을 판단할 수도 있다. 특히 쓰레기소각시설의 설계에서 공연비, 연소가스량, 연소시설의 용적, 저위발열량 등을 추정할 수 있는 기본 자료로써 필수요소이고 또한 연소 속도론적 연구도

소각처리계획을 수립하기 위해서는 중요한 절차이다. 쓰레기의 특성과 열중량감량에 따라 처리시설의 운영정도가 결정될 수 있으므로 정확한 데이터를 산출하는 것에 따라 시설비와 운영비용을 절감하는 것이 가능하다.

전체적인 쓰레기 처리현황을 보면 재활용이 크게 확대되고 매립처리비율이 크게 낮아지는 한편, 소각처리율은 점진적으로 증가하는 추세에 있다. 즉 1995년에는 생활쓰레기 중 72.3%를 매립처리하고, 23.7%만을 재활용하였으나 쓰레기 종량제 실시 및 재활용정책 등에 힘입어 2003년에는 재활용률이 45.2%로 크게 증가하고 매립 처리율은 40.3%로 낮아지는 등 쓰레기처리구조가 바람직한 방향으로 변화되고 있다.

그러나 재활용하고 남은 생활쓰레기 중 타는 쓰레기가 80%에 이르고 있음에도 주민의 반대 등으로 인한 소각시설 건설 지연 등으로 소각률은 14.5%에 불과해 이에 대한 적극적인 대응이 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 도시생활쓰레기를 가연물과 불연물로 분류하고 도시생활쓰레기의 물리적 조성 분석, 삼성분(수분, 회분, 가연분) 분석, 화학적(C, H, O, N, S) 분석, 그리고 발열량 등으로 분석하여 그 특성을 알고 종류에 따른 열중량감량분석(Thermogravimetric analysis, TGA)을 함으로써 가장 효율적인 소각처리 시설의 운영에 기초자료가 됨을 목적으로 한다.

도시생활쓰레기 처리현황 및 처리목표를 [Table 1]에 나타내었다.

## 2. 실험 및 분석방법

### 2.1 물리적 조성 및 원소분석

1. 수분측정 : 빈 도가니를 미리 105±5°C에서 건조시킨 후 무게를 측정하고 여기에 물리적 조

[Table 1] The Stocktaking of MSW Treatment

(Unit : ton/day)

구분	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
발생량	47,895	44,583	45,614	46,438	48,499	49,902	50,737	50,007	47,705
매립 (목표율)	30,579	25,074	23,544	21,831	21,000	20,724	20,450	18,195	14,789
	63.9%	56.3%	51.6%	47.0%	43.3%	41.5%	40.3%	36.4%	31.0%
소각 (목표율)	3,409	3,943	4,676	5,441	6,577	7,229	7,348	7,224	10,972
	7.1%	8.8%	10.3%	11.7%	13.6%	14.5%	14.5%	14.4%	23.0%
재활용 (목표율)	13,908	15,566	17,394	19,166	20,922	21,948	21,938	24,588	21,944
	29.0%	34.9%	38.1%	41.3%	43.1%	44.0%	45.2%	49.2%	46.0%

성성분 측정에 사용한 시료를 일정량 취하여 그 무게를 측정한다. 그 후 건조기를 사용하여 105±5℃에서 시료의 중량이 항량이 될 때까지 건조(약 1일 이상)시킨 다음 그 무게를 잰다.

- 회분측정 : 수분 분석을 마친 시료를 계속하여 800±25℃의 전기로에서 약 2시간정도 완전히 태우고 30분간 방냉 시킨 후 무게를 측정하여 회분의 무게를 구한다.
- 가연분 측정 : 가연분 측정은 100%에서 수분(%)과 회분(%)을 뺀 나머지로 한다.
- 화학적 성상 분석 : 주로 C, H, N, O, S 를 자동 원소분석기를 이용하여 분석
- 발열량 분석 : 발열량은 통상 고위발열량(HHV, high heating value) 및 저위발열량(LHV, low heating value)이 있다.

Dulong의 발열량 계산식(empirical equation)

$$Q = 145.4C + 620\left(H - \frac{1}{8}O\right) + 41S$$

*unit = Btu/lb*

$$Q = 81C + 342.5\left(H - \frac{1}{8}O\right) + 22.5S$$

*unit = kcal/kg*

∴ 1 Btu ≅ 252 cal, 1lb ≅ 454g  
 ∴ 1Btu/lb = 0.555 kcal/kg

### 2.2 열중량감량분석

열 중량감량분석(Thermogravimetric analysis, TGA)은 온도변화에 따른 시료의 무게변화를 측정

하여 분석하는 방법이다. TGA에 의한 온도-무게 변화량의 곡선으로부터 시료의 열 변화 상태를 알고 정성 및 정량 분석을 가능하게 한다. 또한 이 온도-무게 변화량의 곡선은 사용한 시료의 열 안정성(thermal stability) 및 물질의 구성비 등을 나타내고 가열 중에 생긴 중간체의 열적 성질도 나타내주며 가열이 끝났을 때 나온 찌꺼기의 양도 알 수 있게 해준다.

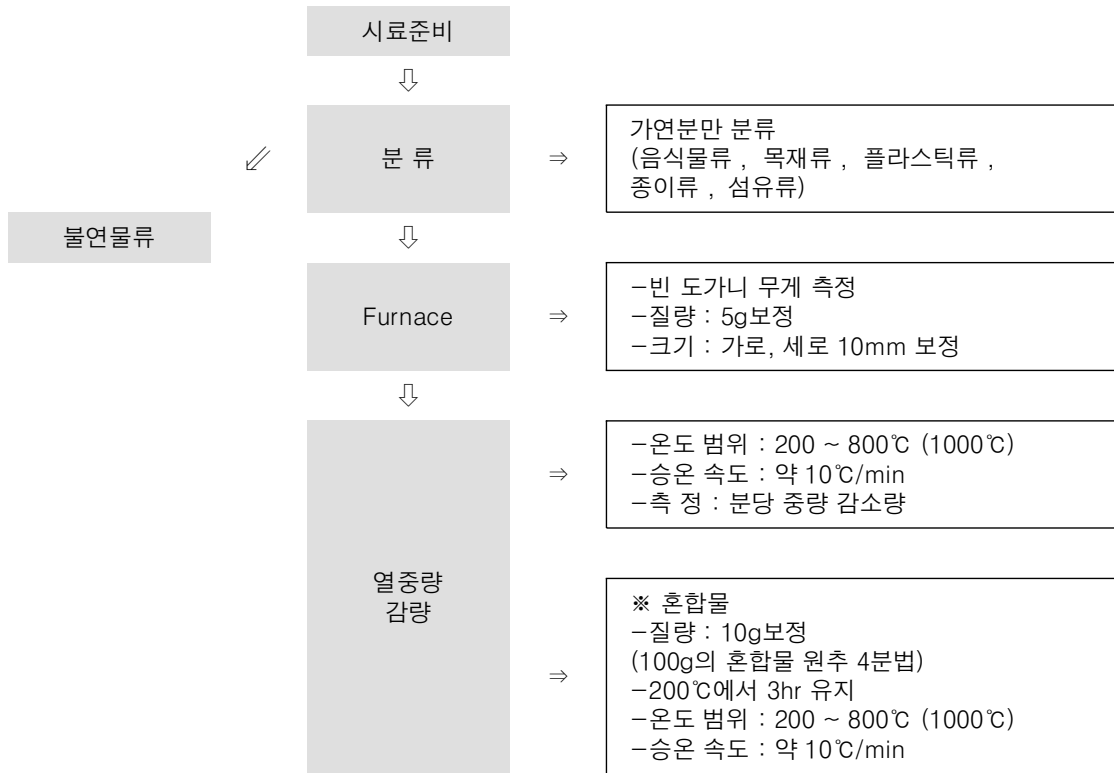
### 2.3 실험 방법

실험 방법은 [Fig. 1]과 같은 순서로 수행하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 생활 쓰레기 물리·화학적 특성 결과

본 연구는 경기도 A 도시생활쓰레기를 시료로 크기는 5가지, 혼합물을 포함시켜 6가지로 구분하여 삼성분과 발열량 그리고 열중량감량을 알아보고 종류별로 비교를 하여보았다 각 종류별로 열중량감량분석을 5회 이상 측정하여 평균값을 얻었다. 사용된 도시쓰레기 시료는 종이류, 섬유류, 목재류, 플라스틱류, 음식물류의 가연성 물질을 사용하였다. 대상으로 한 도시쓰레기의 종류별 분포도는 [Table 2]에 나타내었다. 또한 도시에서 발생되는 쓰레기의 물리·화학적 조성 분석을 [Table 3]에 나타내었다.



[Fig. 1] The experimental procedure.

[Table 2] Classification Dispersion

구분	종이류	섬유류	목재류	플라스틱류	음식물류	불연물류
%	19.2	11.1	27.0	22.6	12.2	7.9

[Table 3] Physico-Chemical Composition of MSW

삼성분 분석		발열량 (cal/g)		원소분석 (%)	
수분 (%)	31.8	고발열량	2897.883	탄소 : 50.983	질소 : 0.000
회분 (%)	7.1(D)   10.4(W)	저발열량	2567.488	수소 : 5.330	황 : 0.000
가연분 (%)	61.1	-	-	산소 : 43.688	-

3.2 열중량감량분석실험결과

[Fig. 2]는 200~800°C에서 종이류의 열중량감량 5회 반복하여 수행한 실험결과를 분석한 것이다.

일반적으로 330~430°C의 온도 구간에서 무게가 감소하는 경향을 보였으며 최대무게 변화 온도는 358°C로 나타났다.

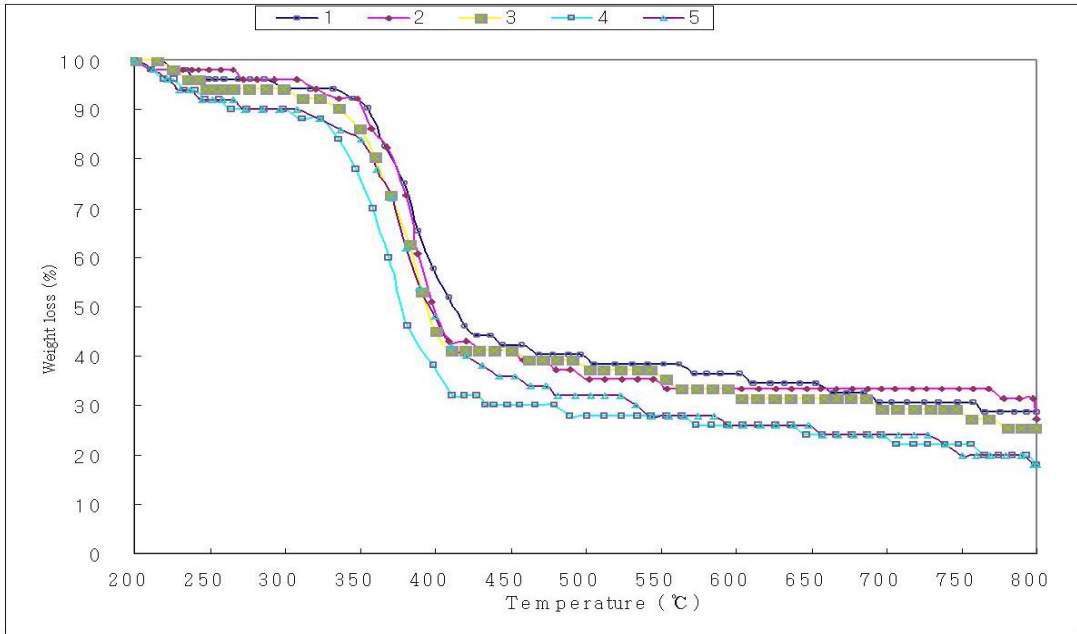
본 그림에서 종이류는 358°C에서 가장 반응속도

가 빠른것을 알 수 있다.

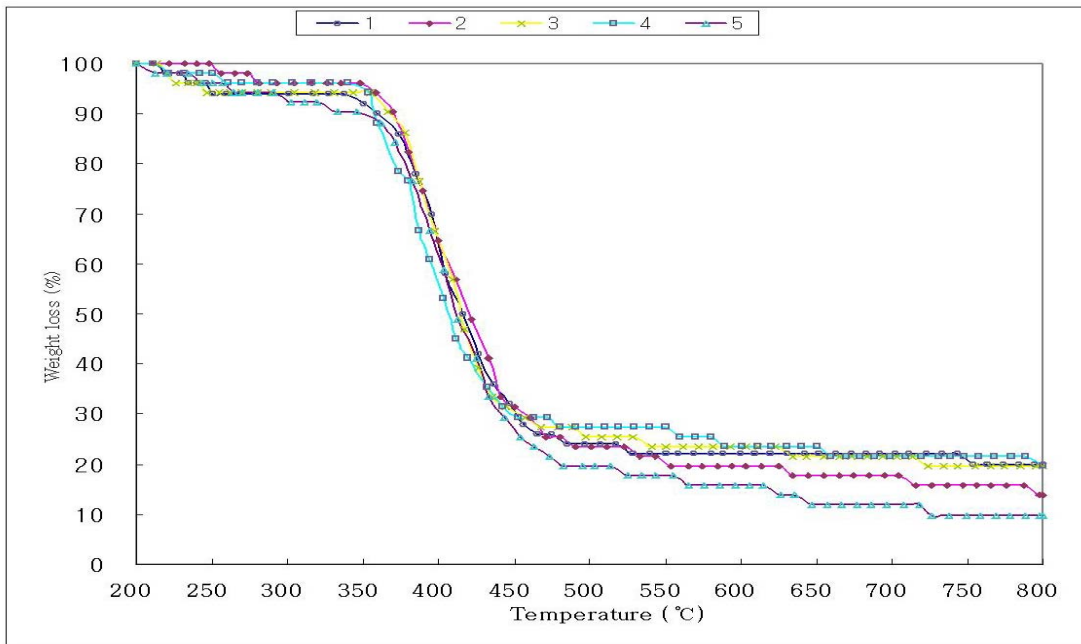
감량을5회 분석한 결과이다. 일반적으로

[Fig. 3]은 200~800℃에서 섬유류의 열중량

350~450℃의 온도 구간에서 무게가 급속히 감소



[Fig. 2] Plots of mass of paper, W versus temperature, T



[Fig. 3] Plots of mass of textile, W versus temperature, T

하는 경향을 보였으며 최대무게 감량변화 온도는 400°C 정도로 나타났다. 본그림에서 종이류는 400°C 정도에서 가장 무게감량 속도가 빠른것을 알 수 있다.

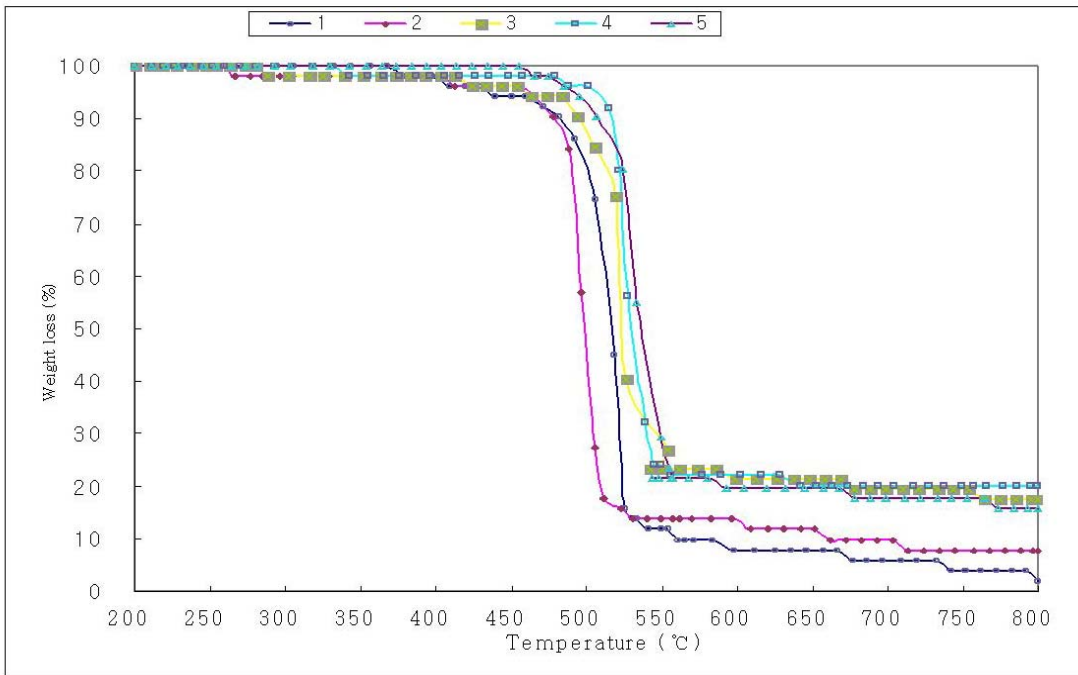
450°C의 온도부분에서 전체무게의 80% 이상 감소하는 것을 알 수 있다.

[Fig. 4]는 200~800°C에서 플라스틱류의 열중량 감량을 5회 분석한 결과이다. 일반적으로 480~530°C의 온도 구간에서 무게가 급속히 감소하는 경향을 보였으며 최대무게 감량변화 온도는 510°C 정도로 나타났다. 본그림에서 플라스틱류는 500°C 정도에서 가장 무게감량 속도가 빠른 것을 알 수 있으며 반응속도가 다른 종류의 폐기물에 비하여 급격하게 일어나는 것을 이해할 수 있으며, 510°C의 온도부분에서 전체무게의 85% 이상 감소하는 것을 알 수 있다. [Fig. 5]는 목재류 폐기물의 열중량 감량을 분석한 결과이다. 일반적으로 350~450°C의 온도 구간에서 무게가 감소하는 경향을 보였으며 최대무게 감량변화 온도는

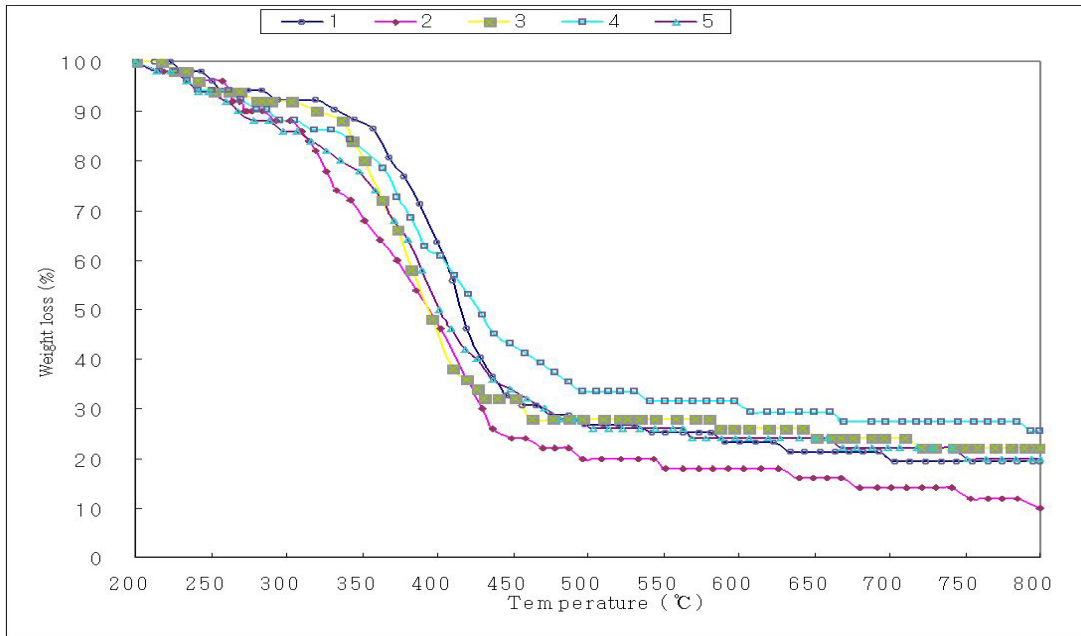
380°C 정도로 나타났다. 본그림에서 목재류는 수분함량이 높아서 무게감량속도가 다른 부류의 폐기물에 비하여 상대적으로 느리며 380°C 정도에서 가장 무게감량 속도가 빠른것을 알 수 있으며 반응속도가 다른 종류의 폐기물에 비하여 느리게 일어나는 것을 이해할 수 있다. [Fig. 6]은 200~800°C에서 음식물류 폐기물의 열중량감량을 분석한 결과이며 250~450°C의 온도 구간에서 무게가 감소되었으며 꾸준히 일정한 무게가 감소됨을 보였다.

[Fig. 7]은 혼합폐기물의 열중량감량을 분석한 결과이며 300~470°C의 온도 구간에서 무게가 감소되었으며 꾸준히 일정한 무게가 감소되었고 400°C 초반에서 그나마 변화 폭이 컸다

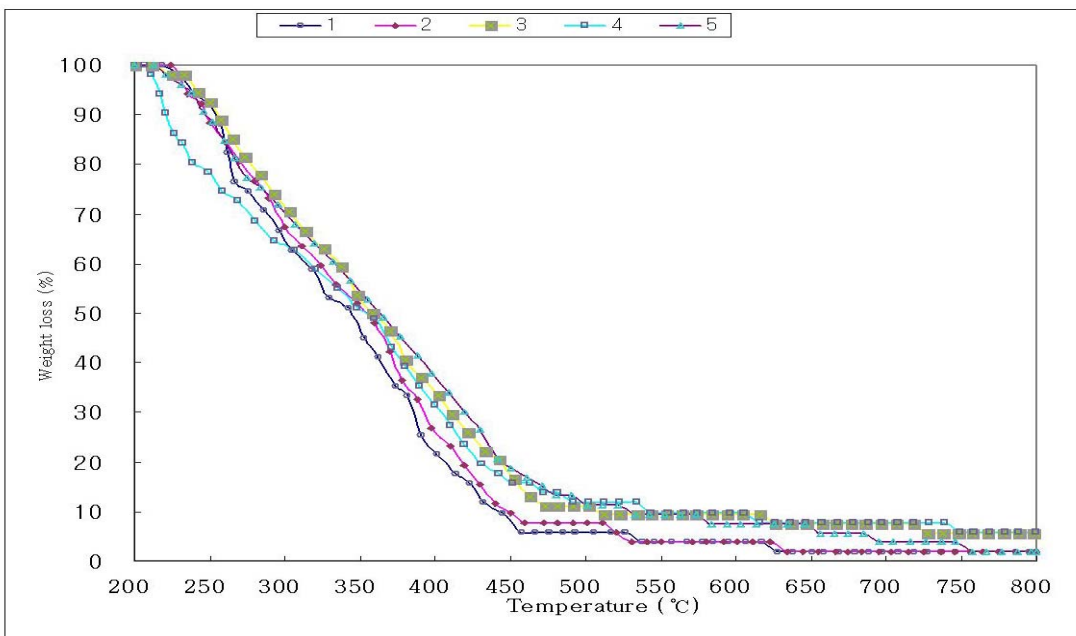
[Fig. 8]은 대상 폐기물의 무게감량속도를 분석 결과 플라스틱이 반응속도가 가장 빠른 것으로 나타났고 음식물과 혼합물이 반응속도가 느린 것으로 나타났다. 반응속도에 수분의 영향이 중요 변수임을 이해할 수 있다.



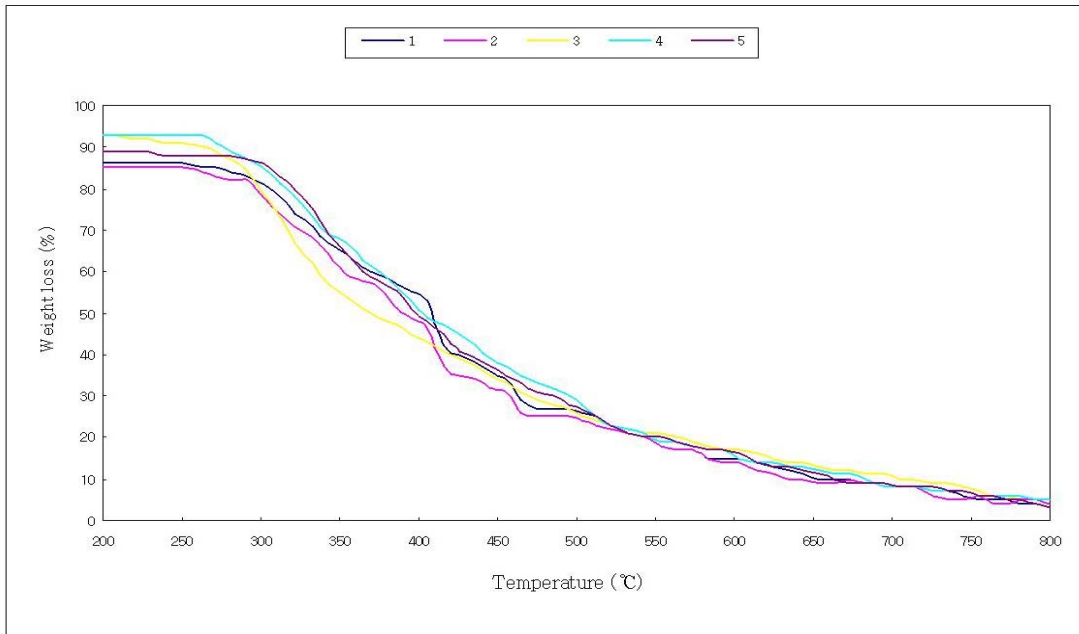
[Fig. 4] Plots of mass of plastic, W versus temperature, T



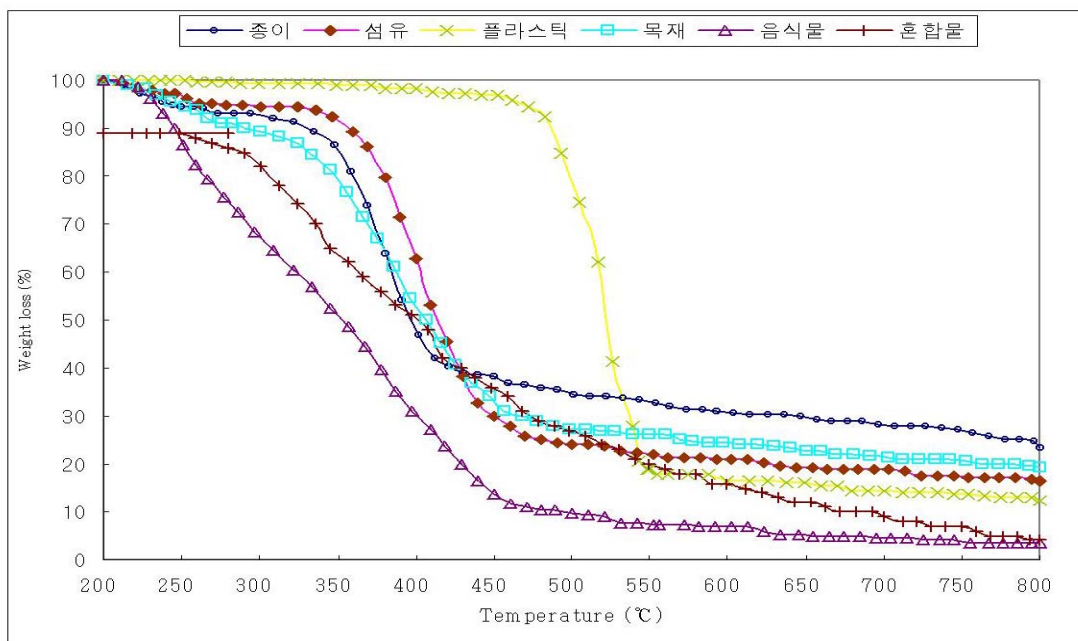
[Fig. 5] Plots of mass of wood, W versus temperature, T



[Fig. 6] Plots of mass of food, W versus temperature, T



[Fig. 7] Plots of mass of mixture of waste, W versus temperature, T



[Fig. 8] Plots of mass of waste, W versus temperature, T



#### 4. 결론

본 연구는 도시생활쓰레기의 물리·화학적 분석 및 발열량 등으로 그 특성을 알고반응기를 이용한 열중량감량 분석을 하였다.

물리·화학적 특성으로 쓰레기의 삼성분 중 가연분이 약 61%로 다른 수분(약 32%) 회분(약 7%)보다 함유량이 많이 나타났고 쓰레기의 원소분석 결과 종류에 관계없이 탄소와 수소(약 94%)의 존재량이 대부분이었으며 쓰레기의 발열량 분석 결과 고위발열량은 2897.883(cal/g)의 값을 갖는 것으로 나타났다.

TGA를 이용하여 도시쓰레기의 열적 특성을 분석한 결과는 온도가 증가함에 따라서 시료 중에 함유된 휘발분이 지속적으로 무게 감량이 일어났으며 특히 300 ~ 500°C에서 열중량감량이 활발히 진행되고 있음을 알 수 가 있다.

또한 결과 값을 나타내는 그래프의 기울기가 급할수록 그 시료의 반응속도가 빠르고 그래프의 기울기가 완만할수록 그 시료의 반응속도가 느리다는 것을 알 수 있다.

이 자료를 이용하여 소각처리 적용 및 퇴비화의 타당성을 판단할 수도 있다. 특히 쓰레기소각시설의 설계에서 공연비, 연소가스량, 연소시설의 용적, 저위발열량 등을 추정할 수 있고 효율적인 운영에 있어서 기본 자료로 필수요소이다.

#### 사사

본 논문은 2005년 상지대학교 교내연구지원에 의하여 수행 되었습니다.

#### 참고문헌

1. 이창우 외 23인, "한국환경보고서", (사)녹색연합 부설 녹색사회연구소, pp. 115 (2006).
2. 환경부, "2006 환경백서", pp. 112 (2006).

3. P.Aarne Vesilind 외 2인, "폐기물 처리공학", 동화기술, pp. 213 (2006).
4. 김영성 "TGA에서의 반응속도 연구에 관한 소고 - 석탄, 타이어, 플라스틱 열분해 의 비교", 화학공학, 29(6), pp. 752~756 (1991).
5. 정준석·오세천 외 3인. "TGA를 이용한 SBR 열분해의 속도론적 해석", 한양대학교 환경공학과. 한국폐기물학회, 한국폐기물학회지, 15(7), pp. 799~807 (1998).
6. 류돈식·권상숙 외 2인(2001). "폐플라스틱의 연속식 열분해", 강원대학교 환경생물공학부. 대한환경공학회 대한환경공학회지, 23(2), pp. 207~216 (2001).
7. 김영성. "TGA에서의 플라스틱 혼합물의 열분해 특성", 한국동력자원연구소 에너지환경연구부, 한국화학공학회, 화학공학, 30(2), pp. 133~138 (1992).
8. 김태석·오세천 외 . "TGA를 이용한 폴리프로필렌 열분해의 속도론적 해석". 한양대학교 화학공학과. 한국폐기물학회, 한국폐기물학회지, 16(2), pp. 115~123 (1999).
9. 김영성. "Transfer Lag를 고려한 Arrhenius 형태의 속도식에 의한 플라스틱 TGA 열분해의 해석", 한국동력자원연구소 에너지환경연구부 , 화학공학, 29(4), pp. 503~511 (1991).
10. 신종순 외 2인 "인공열화에 의한 종이 permanence의 물리·화학적 및 속도론적 연구 (제 3 보) - Cellulose의 열분해 및 속도론적 고찰 -", 한국펄프·종이공학회, 펄프·종이기술 27(3), pp. 51~60 (1995).
11. 심성훈·김석준 외 8인. "생활 폐기물의 열분해 연료화", 한국에너지공학회, 한국에너지공학회 학술발표회 1, pp. 617~620 (2003).
12. K. Brian , Gullett & Peter Smith "Thermogravimetric Study of the Decomposition of Pelletized Cellulose at 315°C~800°C". Combustion and Flame 67, pp. 143~151(1987). 