

온도변화에 따른 음식물류폐기물의 탄화특성에 관한 연구

김남찬[†] · 엄민섭 · 김성환
광운대학교 환경공학과

A Study on the Carbonization Characteristics of Food Waste by Temperature Variation

Nam-Chan Kim[†], Min-Seop Eom, and Seong-Hwan Kim

Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

Received March 2009, accepted June 2009

Food wastes were collected and analyzed from the end of August to early November, 2007. The results showed that the contents of moisture, ash, volatile solids, and fixed carbon were 80%, 8%, 10.71%, and 1.86%, respectively. The combustible solids mainly consisted of C (49.61%) and O (38.86%). Whereas high heat value (3,300-4,800 kcal/kg) was relatively high, low heat value was drastically low. Therefore, the drying process was necessary to control moisture content under certain level for the proper carbonation treatment. Thermal cracking characteristics of food waste for different temperature ranges was investigated. The results showed that most moisture and volatile solids were removed and the fixed carbon and ash remained beyond the 450°C. Therefore, most carbonation reaction seems to be stopped at 450°C and at least 450°C should be maintained for proper carbonation treatment.

Key words : Carbonization, Food Waste, High Heat Value, Thermal Cracking

1. 서 론

유기성 폐기물에는 하수슬러지, 분뇨슬러지, 음식물쓰레기 및 폐목재 등이 있으며 이들은 모두 탄소분을 함유한 고분자 화합물로서 대부분이 생물학적으로 불안정하며 일정량 이상의 수분을 함유하고 있기 때문에 안정화 및 감량화 처리가 반드시 요구된다. 이 중 음식물쓰레기의 경우 기존의 사료화 또는 퇴비화와 같은 공법으로 처리할 경우 건조를 위한 에너지 비용이 지속적으로 상승하고 있으며 품질유지의 문제로 인해 부산물의 유통판매가 어려워 심각한 운영상의 문제점을 야기하고 있다.¹⁾ 또한 처리과정에서 발생하는 다량의 탈리액은 높은 유분, BOD 및 COD농도 등에 의해 효과적인 폐수 처리가 어려워 발생량의 80% 이상을 사실상 해양투기에 의존해 왔다. 그러나 최근 런던협약 및 해양수산부

의 정책에 따라 2011년부터 해양투기가 전면 금지됨에 따라 이에 대한 대안이 시급하게 요구되고 있으며 이에 대한 해결수단의 하나로서 탄화처리가 주목받고 있다.

탄화처리는 재래 목탄제조 기술을 폐기물 처리 분야에 적용한 것으로 소각과 같은 열적 산화공정과 달리 산소가 없거나 당량비 이하의 희박한 상태, 즉 환원분위에서 처리물을 고온으로 열처리하는 공법이다. 따라서 탄화처리후 유기물 내의 산소 또는 수소원자는 휘발되어 결과적으로 탄소와 회분만이 고정되게 된다. 또한 휘발반응 후 탄소가 고정된 탄화물은 구조가 다공성으로 비표면적이 넓어 뛰어난 흡착능력을 가지게 된다. 따라서 양질의 탄화물은 고체연료, 흡착제, 흡취제 및 토양개량제 등으로의 고부가가치 재활용이 가능하며 소각 수준의 감량화를 기대할 수 있다.²⁾

따라서 본 연구에서는 국내에서 발생된 음식물쓰레

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kimnc@kw.ac.kr

기를 대상으로 탄화시 가장 중요한 운전인자인 온도조건에 따른 탄화특성에 대하여 알아보하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 시료의 조제

시료는 Y시 B아파트 단지에서 배출된 음식물쓰레기로 단지 내 수거용기에서 주당 1회씩 정기적으로 채취하여 냉장·보관하였다. 각 시료는 구획법에 의해 축소·조제되었으며 손선별을 통하여 금속, 비닐 및 유리와 같은 험잡물을 최대한 제거하였다. 또한 조제한 시료가 균일한 조성을 가지도록 2 mm 이하의 크기로 파쇄하였다. 시료로 사용된 음식물쓰레기의 조성을 조사하기 위하여 공업분석 및 원소분석을 실시하였다. 탄화로 내부로의 원활한 시료공급을 위하여 실험 전 105±5°C 조건에서 일정시간 동안 열풍건조기(FO-600M)를 이용하여 함수율을 40%로 조절하였다.

2.2 실험 장치

실험장치는 Fig. 1과 같으며 크게 투입부, 탄화부, 기

타 제어 및 응축부로 구분된다. Hopper와 screw feeder를 통해 정량 공급된 음식물쓰레기는 탄화로 내의 또 다른 screw feeder를 통해 일정한 체류시간을 유지하며 이동하고 4개의 노즐을 통해 공급된 500°C의 과열증기와 반응한다. 탄화로(I.D. 2 inch×L. 12 inch)는 열과 과열증기에 의한 부식을 최대한 방지하기 위해 SUS 316을 사용하여 제작하였으며 내부에 K-type의 열전대를 설치하여 적절한 탄화온도를 유지하였다. 또한 탄화로 외부에 heat jacket을 설치하여 반응기 내부의 온도가 적절히 유지되도록 보조 열원으로 사용하였다. 탄화로 후단에서 반응이 끝난 탄화물을 냉각 후 회수한 뒤 배가스 내 미세 탄화물의 제거를 위해 hot filter를 설치하고 온도강하에 따라 응축 또는 응결되는 과열증기 및 타르와 같은 액상생성물을 회수하기 위해 chiller와 condenser를 설치하였다. 또한 gas flow meter를 설치하여 배가스의 배출량을 정량하였다.

2.3 실험 방법

음식물쓰레기의 기본 물성을 판단하기 위해 공업분석과 원소분석을 실시하였으며 준비된 시료를 투입한

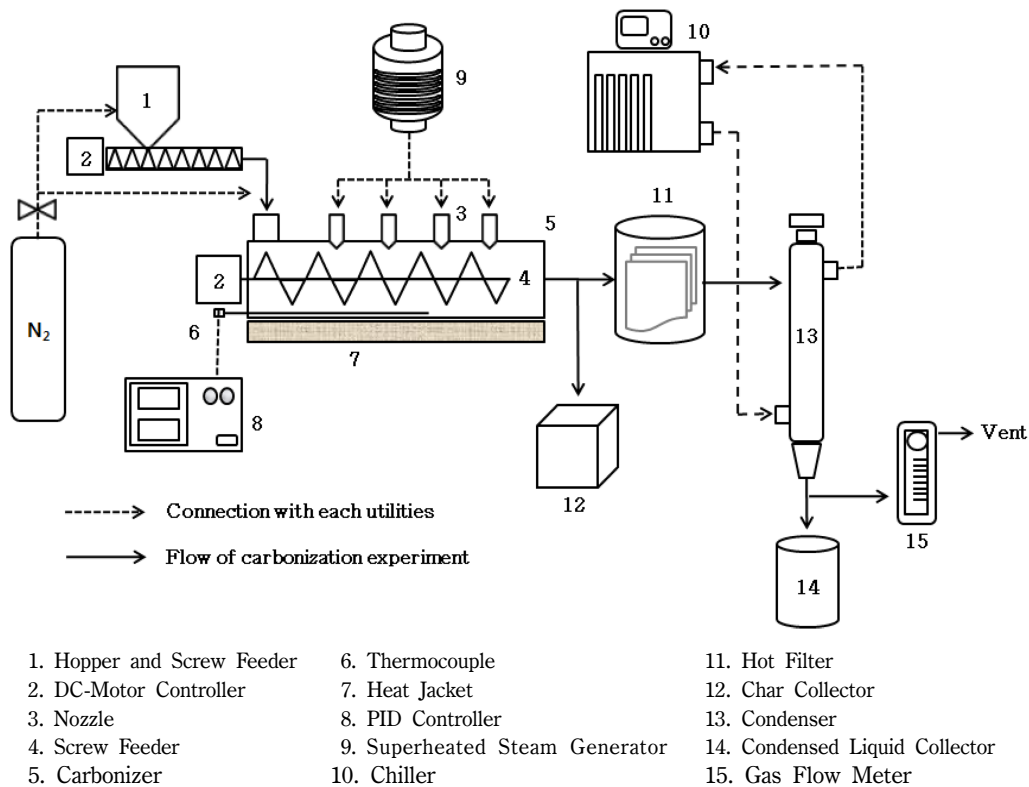


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

후 반응기가 환원분위기를 유지하며 양질의 탄화물을 생성할 수 있도록 공기유입을 방지하기 위하여 각 배관 및 장치의 기밀을 최대한 유지하였으며 N_2 가스로 충분히 purging하여 탄화물의 산화를 방지하며 실험을 수행하였다. 실험 종료 후 생성된 탄화물, 배가스 및 액상생성물의 수율을 관찰하기 위해 각각을 회수하여 정량하였다.

2.4 분석 방법

제조된 시료 및 탄화물의 기초물성을 평가하기 위해 공업분석을 실시하였다. 또한 각각의 화학적 조성 변화를 관찰하기 위해 원소분석기(EA-1110, CES Ins.)를 이용하여 C, H, O, N, S의 5개 항목에 대한 원소분석을 실시하였다. 음식물쓰레기의 경우 염분농도가 최종 부산물의 재활용에 영향을 주기 때문에 염도계(SK-10S)를 이용하여 염분농도를 측정하였으며 시료의 열중량 분석은 열중량 분석기(Versa Therm HS, Thermo Chan Co.)를 사용하여 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 700°C 까지 승온하며 열중량 변화를 관찰하였다. 이 때 시료의 양은 약 5mg이었으며 $20\text{ mL}/\text{min}$ 유량의 질소를 운반기체로 사용하였다. 시료의 발열량은 Bomb Calorimeter (FTT Calorimeter)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 음식물쓰레기의 기본물성

음식물쓰레기의 월별 함수율의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 음식물쓰레기의 함수율은 탄화공정에서 탄화로의 열부하를 변화시켜 탄화시간 및 탄화물의 품질에 영향을 주게 된다. 또한 탄화공정 진단에서 건조공정을 운전할 경우 건조시간 및 건조물의 함수율을 변화시키므로 결과적으로 탄화공정 전반에 영향을 주는 중요한 요소이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 채취한 음식물쓰레기의 함수율은 8월부터 11월까지 약간의 변화는 존재하나 약 80%를 유지하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 겨울철로 갈수록 온도가 낮아짐에 따라 함수율이 약 5% 정도 감소하여 75%까지 떨어지기도 한다. 여름에는 과일 등 수분이 많은 음식물의 함유 및 우기에 따른 영향을 볼 수 있다. 사료화의 경우 음식물쓰레기의 수분이 80% 이상에서 장기간 공기 중에 노출될 경우 미생물에 의한 유기물 분해로 인해 추가적인 수분 발생과 함께 유해성 세균이 증식되어 제품의 안정성 확보에 문제가 야기될 수 있으나 열적처리 공정인 탄화

의 경우 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 그러나 높은 함수율의 경우 탄화시간 및 탄화율에 영향을 주므로 탄화공정의 운전비에 대한 영향인자로 작용할 것으로 판단된다.

음식물쓰레기의 월별 휘발성물질 함량 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 탄화공정의 경우 처리가 완료되면 대부분의 휘발성 유기물은 건류가스 내에 존재하며 탄화물에는 약 15% 미만으로 존재하게 된다. 탄화물을 재생연료로 사용하고자 할 경우 휘발분의 함량이 너무 낮게 되면 작화성이 크게 떨어져 연료로서의 가치가 감소하므로 적절한 휘발분의 함량은 매우 중요하다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 최초 음식물쓰레기는 8월부터 11월까지 16~20%로 대체적으로 낮은 값을 보여 주었다. 그리고 수분의 양이 감소하는 것에 비해 상대적으로 휘발성 고형분의 양이 약간씩 늘어남을 볼 수 있었다. 폐기물중 휘발성 고형분의 함량을 보면 70% 정도에서 소각 처리시 좋은 효율을 보이는 것으로 알려져 있다. 또한 휘발성물질의 함량은 Fig. 2의 함수율 그래프의 역 모양인 것으로 볼 때 휘발성물질의 함량은 함수율에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

음식물쓰레기의 고정탄소 함량 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 고정탄소는 조사기

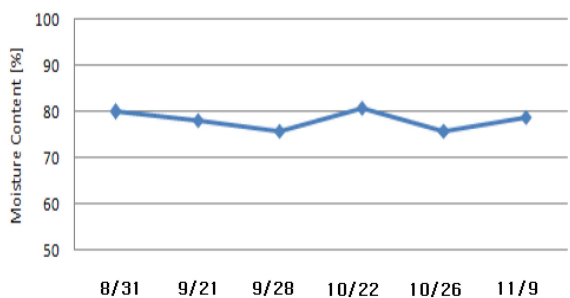


Fig. 2. Monthly moisture content variation for food waste

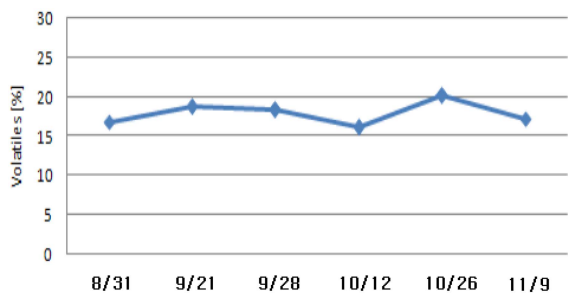


Fig. 3. Monthly volatiles variation for food waste

간 내내 매우 낮은 값을 나타내었다. 탄화물의 경우 고정탄소의 함량이 40% 이상이 유지되어야 우수한 제품으로 평가받을 수 있다. 특히 제철공정에서 코우크스의 대체제로 탄화물을 사용할 경우 앞서 기술한 휘발성물질의 함량을 최소화하고 고정탄소의 함량을 극대화시켜야 한다. 앞서 기술된 Fig. 3의 결과와 비교해 볼 때 음식물쓰레기의 가연성분 중 대부분은 휘발성물질로 판단된다.

음식물쓰레기의 월별 회분 농도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 회분 농도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 6에 음식물쓰레기의 월별 염분농도 변화를 나타내었다. 11월의 경우 10월 및 9월에 비해 염분농도가 다소 상승하였으나 주목할만한 변화는 아닌 것으로 판단된다. 김장철이 시작되는 11월 중순이 지날 경우 계

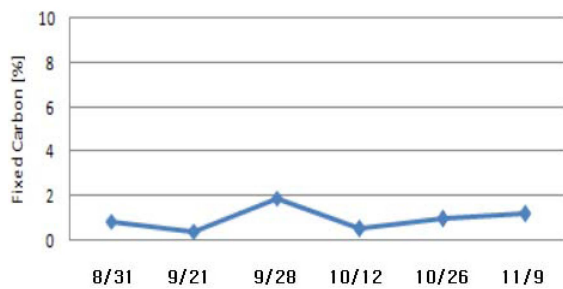


Fig. 4. Monthly fixed carbon variation for food waste

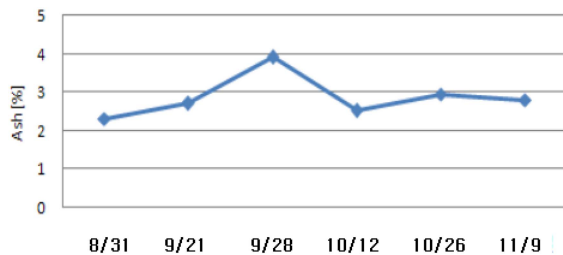


Fig. 5. Monthly ash variation for food waste

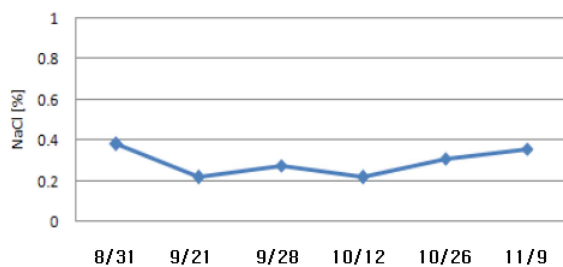


Fig. 6. Monthly NaCl variation for food waste

절적인 특징으로 인해 염분농도의 상승이 예상된다.

Fig. 7에 음식물쓰레기의 월별 유분농도를 나타내었다. 유분의 경우 건조 및 탄화공정에서 열전달 효율에 영향을 줄 수 있다. 특히 건조공정의 경우 음식물쓰레기의 유분농도가 높을 경우 파쇄된 음식물쓰레기 입자의 표면에 막을 형성하여 내부로의 열전달을 방해하게 된다. 또한 탄화시에도 열전달을 방해하여 최종적으로 탄화물의 생성에 영향을 주게 된다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 음식물쓰레기의 유분 농도는 약 10,000~20,000 ppm임을 알 수 있다.

음식물쓰레기의 월별 원소분석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 먼저 탄소와 수소를 보면 탄소의 값은 약 45~50%의 값을 나타내었고, 수소는 5~6% 내외의 값을 나타내었다. 이 결과를 통해 원소들의 값이 상당히 일정함을 알 수 있으며 음식물쓰레기는 시간과 환경의 변화와 관계없이 대체로 거의 일정하게 유입된다는 것도 알 수 있었다. 산소와 질소의 값 역시 반입되는 음식물쓰레기의 원소량은 산소 35~40%, 질소 3~4%로서 시간과 환경적 변화에서 적은 변화를 나타내었다.

이상의 결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 음식물쓰레기의 평균 함유율은 약 80%였으며 회분은 8%로 분석되었다. 탄화물

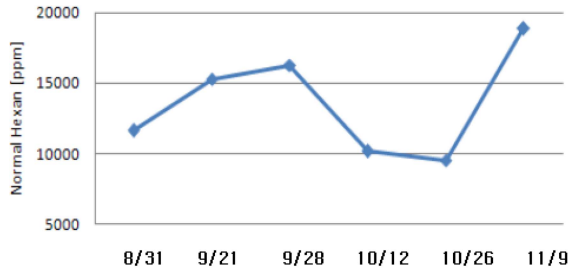


Fig. 7. Monthly normal hexan variation for food waste

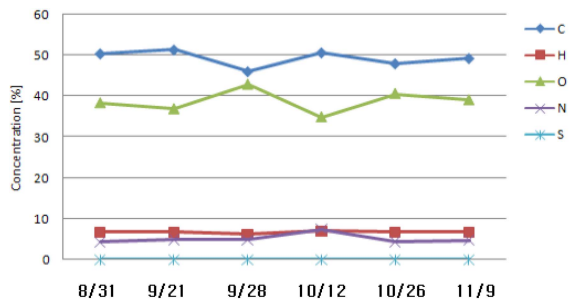


Fig. 8. Monthly variation of element analysis for food waste

Table 1. Results of physicochemical analysis for food waste

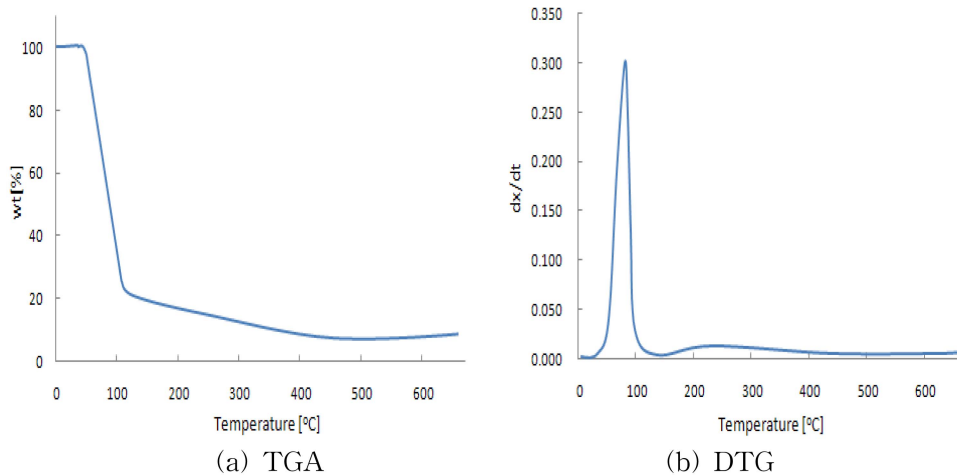
Approximate analysis[wt%]				Ultimate analysis[wt%, dry basis]				
Moisure	Volatiles	Fixed carbon	Ash	C	H	O	N	S
80.64	10.71	1.86	6.79	49.61	6.71	38.86	4.82	0.00
Heating value[kcal/kg, dry basis]				NaCl concentration[%]				
3,300~4,800				1.06				

을 연료로서 평가하는 데 가장 중요한 기준은 휘발분과 고정탄소이며 이중 고정탄소의 경우 단백질, 지방, 탄수화물을 구성하는 중요한 성분이다. 본 연구에 사용된 음식물쓰레기의 휘발분과 고정탄소의 함량은 각각 10.71%와 1.86%로 나타났다. 이 결과는 기존에 보고된 대부분의 음식물쓰레기의 조성구성과 대체로 유사하므로 대표성을 충분히 가지는 시료로 판단할 수 있다. 또한 수분과 회분을 제외한 가연분의 화학적 조성은 C가 49.61%, O가 38.86%로 대부분을 차지하였으며 탄화과정에서 약취를 유발할 수 있는 S의 경우 검출되지 않았다. 음식물쓰레기의 고위발열량은 약 3,300~4,800 kcal/kg으로 비교적 높은 값을 나타내었으나 수분의 응축잠열을 제외한 저위발열량의 값은 현저하게 낮아 적절한 탄화처리를 위하여 탄화로 앞단에서 일정수준 이하로 함수율을 낮춰야 할 필요성이 있음을 알 수 있다.

3.2 온도에 따른 음식물쓰레기의 열중량 변화

음식물쓰레기의 온도에 따른 열적 거동을 최대한 모사하기 위해 건조하지 않은 생 음식물쓰레기를 이용하여 열중량 분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나

타내었다. 비등은 열중량 분석은 일정 온도범위 내에서 일어나는 시료의 열화학적 반응을 보여주는 것으로 적정 탄화온도를 예측할 수 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 음식물쓰레기의 열중량 변화는 크게 세 부분으로 구분된다. 우선 1단계 구간은 승온 후 약 120°C까지의 저온영역으로 전체의 약 78%가 감량되었으며, 이것은 음식물쓰레기의 함수율이 80%임을 감안할 때 interstitial water 및 bound water를 제외한 대부분의 수분이 이 구간에서 제거되는 건조구간임을 알 수 있다. 또한 일부 미량이나마 열적으로 불안정한 탄수화물 및 단백질 구성성분 중 일부가 분해되었음을 알 수 있다.³⁾ 2단계로 수분건조 이후 120~450°C의 구간에서 약 8%의 열적 감량이 서서히 관찰되었으며 이는 음식물쓰레기의 휘발분이 휘발하면서 나타나는 현상이며 1단계 구간의 분해산물로 생성된 열적으로 안정된 중간생성물이 분해되는 것으로도 추정할 수 있다.³⁾ 2단계 구간에서의 중량 감소는 1단계에 비해 완만한 커브를 보여 주며 이것은 음식물쓰레기의 높은 함수율에 기인하는 것으로 판단된다. 마지막으로 450°C 이상의 온도 구간에서는 거의 질량변화가 없었다. Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 DTG 그래프에서도 이와 같은 사실을

**Fig. 9.** TGA and DTG curve by thermogravimetry analysis for food waste

뒷받침하고 있다. 450°C 이상의 구간에서 더 이상의 질량변화가 없는 것은 음식물쓰레기가 환원분위에서 대부분의 수분과 휘발분이 제거된 후 남은 고정탄소와 ash만이 이 온도구간에 존재하기 때문이며 결과적으로 수분건조를 제외한 대부분의 탄화반응은 450°C에서 종료될 것으로 예상된다. 따라서 음식물쓰레기의 탄화를 위해 최소한 450°C 이상의 온도가 유지되어야 함을 예측할 수 있다. 음식물쓰레기의 중량감소 변화 거동은 다른 연구자들에 의한 결과와 마찬가지로 각 단계에서 거의 1차 반응과 유사함을 보이고 있다.

3.3 온도에 따른 탄화 부산물의 수율 변화

탄화와 같은 열분해 공정에서 온도는 중요한 인자로 알려져 있다. 일반적으로 온도가 증가하면 공급된 열량에 의해 시료내의 휘발분이 휘발하여 상대적으로 저분자 화합물인 가스나 액상 생성물로 전환되며 이에 따라 가스 및 액상 생성물의 수율이 증가하고 char와 같은 탄화물의 수율이 감소하게 된다. Fig. 10은 온도변화에 따른 탄화물의 수율변화를 나타낸 것으로써 탄화온도가 증가함에 따라 수탄율이 감소하는 전형적인 열분해 거동을 보여주고 있다.⁴⁾ Fig. 10에서 보는 바와 같이 온도가 500°C 이상으로 증가하여도 수탄율은 변화하지 않으며 약 5%를 유지하는 것으로 볼 때 음식물쓰레기를 탄화하기 위한 최적의 온도는 500°C로 판단된다. 액상 생성물의 경우 200°C의 저온에서도 약 55%의 수율을 보이고 있으나 대부분이 부분 건조후 투입된 음식물쓰레기내 수분으로 인한 결과이므로 일반적인 타르와 같은 열분해 생성물로 보기는 어렵다. 국내에서 발생하는 음식물쓰레기의 경우 최근 식생활 문화의 변화 등을 이유로 서구화되어 동물성 음식의 함량이 높아지기는 했으나 쌀을 주식으로 하는 문화로 인해 식물성 쓰레기의 함량이 월등하게 높은 특징을 가지고 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 200~350°C에서 탄화물의 중량 감소율이 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 음식물쓰레기내 채소와 같은 식물성 쓰레기를 구성하는 주요 성분중 셀룰로오스는 240~350°C, 헤미셀룰로오스는 200~250°C에서 주로 급격하게 열분해되어 휘발성 물질인 CO, CO₂ 및 기타 응축성 가스로 전환되기 때문으로 판단된다. Ercin and Yuda 등⁵⁾은 *Abies bornmulleriana*재를 저온으로 탄화시켜 50~150°C에서는 5%, 200~300°C에서는 40~90%의 열분해가 발생함을 보고하였다. Slocum *et al.*⁶⁾은 oak와 hickory재를 205~800°C에서 탄화시켜 중량 감

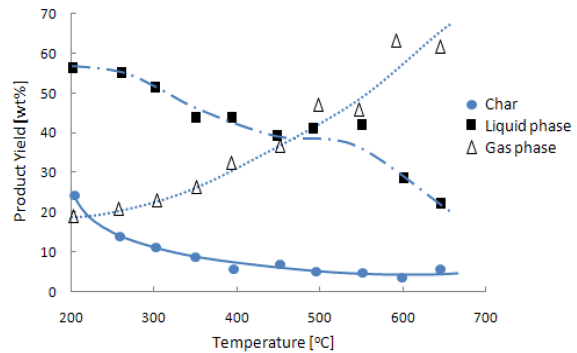


Fig. 10. Product yield of carbide by temperature variation

소율을 측정하여 모두 탄화온도가 증가할수록 수탄율이 감소되고 총 중량 감소율은 250~300°C에서 40% 발생함을 보고하였다. 본 연구에 사용된 시료는 비록 목재는 아니나 대부분이 목재와 유사한 탄소가 주성분인 유기물로 이러한 선행 연구결과들과 비교해 볼 때 대체로 유사한 탄화 거동을 보이는 것으로 판단된다.

4. 결 론

국내에서 발생된 음식물쓰레기를 2007년 8월 말부터 11월 초까지 채취하여 분석한 결과 함수율은 약 80%였으며 회분은 8%, 휘발분과 고정탄소의 함량은 각각 10.71%와 1.86%로 나타났다. 또한 수분과 회분을 제외한 가연분의 화학적 조성은 C가 49.61%, O가 38.86%로 대부분이었으며 고위발열량은 약 3,300~4,800 kcal/kg으로 비교적 높은 값이었으나 저위발열량의 경우 발열량이 현저하게 떨어져 적절한 탄화처리를 위해 일정 수준 이하로 함수율을 조절하기 위한 건조공정이 반드시 필요함을 알 수 있었다.

음식물쓰레기의 온도구간별 thermal cracking 특성을 살펴본 결과 450°C 이상의 구간에서 음식물쓰레기내 대부분의 수분과 휘발분이 제거된 후 남은 고정탄소와 ash만이 존재하므로 대부분의 탄화반응은 450°C에서 종료될 것으로 예상되며 적절한 탄화처리를 위해 최소한 450°C 이상의 온도가 유지되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이동훈, “음식물류 폐기물의 효율적인 처리방안에 대한 연구”, **2003**, 수도권 매립지 관리공사.
2. 박상우, *한국폐기물학회지*, **2005**, 22(3), 226-235.
3. 장은석, 김승도, 엄유진, 송동근, 박종호, 정재성, 공성호, 김승수, *한국폐기물학회지*, **2004**, 21(1), 67-82.
4. Maria D. Guillen and Maria L. Ibargoitia, *J. Agric. Food chem*, **1998**, 46(4), 1276-1285.
5. Ercin, D. and T. Yuda. *J. of Anal. Appl. Pyrolysis*, **2003**, 67, 11-22.
6. Slocum, D. H., E. A. McGinnes, and Jr, F. C. Beall. *Wood Science*, **1978**, 11(1), 42-47.