

저온 열분해조건에서 PP 및 PS계 플라스틱의 열분해물 생성특성 연구

김상훈¹, 장현태², 차왕석^{3*}

Production properties of pyrolytic matter of PP and PS plastics in a low temperature pyrolysis condition

Sang-Hoon Kim¹, Hyun-Tae Jang² and Wang-Seog Cha^{3*}

요약 열중량반응기와 회분식 미분형반응기를 이용하여 polypropylene(PP)과 polystyrene(PS)의 열분해특성을 연구하였다. 열중량반응기로부터 얻은 동적특성곡선은 열분해온도에 대한 만족할 만한 정보를 제공해 주었으며, PS가 PP보다 30 ~ 50℃ 낮은 온도에서 열분해가 일어남을 알 수 있었다. 미분반응기에서 PP의 경우 열분해 온도와 시간이 증가할수록 액상 생성물의 수율과 분자량분포는 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. PS의 경우 반응온도와 시간이 증가할수록 해중합이 촉진되어 styrene monomer의 생성이 두드러졌다. 열분해반응에서 말단절단의 속도계수인 활성화에너지 값은 PP의 경우 50.0 kcal/mole, PS의 경우 45.2 kcal/mole이었다.

Abstract Thermal degradation characteristics of polypropylene and polystyrene have been studied in the thermogravimetric(TG) reactor and batch-type microreactor. The dynamic thermogravimetric curve of TG provided a valuable information about pyrolysis temperature. It was found that PS was thermally degraded at lower temperature of 30 ~ 50℃ than PP. It was found that the yield and molecular weight of liquid product in the microreactor were decreased with the increase of reaction temperature and time in the case of PP. The production of styrene monomer was significantly increased by the promotion of depolymerization with the increase of temperature and time.

The chain-end scission rate parameters were determined to be 50.0 kcal/mole of PP, 45.2 kcal/mole of PS by the Arrhenius plot.

Key words : PP, PS, TG, microreactor, liquid product, activation energy

1. 서론

국내에서 생산된 5대 범용플라스틱은 2005년 기준으로 약 1,000만톤에 이르며, 이 중에서 PP와 PS가 전체의 약 30% 정도를 차지하고 있다[1,2]. PP와 PS의 경우 일부 물질회수 등으로 재활용되거나 불순물이 포함되어 있거나, 2가지 이상으로 혼합되어 있는 경우 대부분 소각이나 매립되고 있는 실정이다. 에너지원이 거의 없는 국내의 경우 폐플라스틱과 같은 고열량을 가진 폐자원을 연료유

등과 같은 에너지로 전환할 수 있으면 에너지의 절약과 아울러 폐기물 처리에 필요한 비용을 최대로 줄일 수 있고 환경보존도 이룰 수 있으리라 판단된다.

PP와 PS가 포함된 플라스틱을 재활용하는 방법에는 크게 나누어 물질 재활용과 화학적 재활용 방법이 있다. 물질 재활용방법에 적용되는 폐플라스틱은 비교적 순수하게 분리된 깨끗한 플라스틱이 주대상이어서 아직까지 재활용율이 높지 않다. 이에 반해 화학적 재활용방법에 적용되는 폐플라스틱은 일부 불순물이 포함되어 있거나 여러 종류의 플라스틱이 혼합된 경우에도 적용될 수 있어 플라스틱의 상태에 비교적 영향을 받지 않는 방법이라 할 수 있다[2].

화학적 재활용 기술 중 가장 활발하게 연구 및 상용화가 이루어지고 있는 기술은 액체연료화기술이며[3], 액체 연료화는 폐플라스틱, 페비닐, 페타이어 등의 고분자 폐

이 논문은 산자부의 표준화기술개발사업연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

¹군산대학교 토목환경공학부, 박사과정

²한서대학교 화학공학과, 부교수

³군산대학교 토목환경공학부, 교수

*교신저자 : 차왕석(wscha@kunsan.ac.kr)

기물을 무산소 및 저온열분해(350~450°C) 조건에서 고분자를 저분자로 전환시켜 사용가능한 연료유로 변환시키는 기술로서 국내외적으로 활발히 연구가 진행되고 있다[4~6]. 액체 연료화공정의 효율적인 운전 및 설계를 위해서는 고상, 액상 그리고 기상 생성물의 조성과 수율을 포함한 열분해 특성 및 속도에 관한 연구가 선행되어야 한다. 플라스틱 열분해반응은 플라스틱의 주쇄가 불규칙하게 순차적으로 열분해되어 다양한 종류의 라디칼이 생성되어 결합의 절단과 일부의 재조합반응에 의한 왁스성분의 형성 등이 일어나는 라디칼반응이며 이러한 라디칼반응은 다양한 분포를 갖는 생성물이 얻어진다는 것이 특징이다[7].

열분해반응의 kinetics 연구에 적용되고 있는 방법은 열중량분석법, 용융점측정법, 빛분산법, 점도측정법, 분자량분포곡선을 이용하는 방법 등이 있으나[8~11] 용융점측정법, 빛분산법 그리고 점도측정법은 적용물질의 제한성으로 일부 특수한 경우에만 사용되고 있다.

열중량분석법은 실험의 간편성과 신속성으로 인해 가장 널리 이용되고 있는 방법으로 수 mg 시료의 휘발 또는 분해되는 과정을 수평균분자량에 대한 적절한 관계식으로 표현할 수 있는 정보를 제공하나[12], 사용시료가 수 mg이어서 열분해반응 중의 메카니즘, 각 생성물의 수율 및 조성 등의 자료를 제공하지 못하는 단점이 있다.

분자량분포곡선을 이용하는 방법은 반응과정 중 모든 생성물의 분자량분포에 대한 자료와 분자량분포로부터 얻는 평균분자량, 0차 모멘트 그리고 1차 모멘트 등에 관한 정보를 제공함으로써 열분해 특성과 속도의 해석을 가능하게 해준다[13].

본 연구에서는 물질 및 연속모멘트수지식을 이용한 열분해 특성 및 반응속도를 해석하기 위해 수 밀리그램 시료의 휘발성분 무게감소에 대한 결과만을 나타내는 열중량반응기 대신에 다양한 반응조건에서 고상, 액상, 기상 생성물의 수율과 조성을 제공하는 회분식 미분형 반응기를 이용하여 저온 열분해 반응에서 중요한 공정변수인 반응온도와 반응시간에 대한 영향을 조사하였다. 아울러 각 반응조건별 액상 생성물의 탄소수 분포 결과를 연속분포속도식에 적용하여 열분해 반응의 속도론적 연구도 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

열중량분석기(Seiko Co, TG/DAT 6200)를 이용하여

PP와 PS의 열적특성곡선을 얻었다. 액상 및 기상생성물의 수율과 조성은 미분형 반응기가 설치된 열분해 실험장치를 이용하였으며, 실험장치의 개략도는 <그림 1>과 같다. 실험장치의 주요부분은 미분형 반응기를 일정 열분해온도까지 상승 및 냉각시켜주는 가열 및 냉각부, 주입된 PP 및 PS계 플라스틱을 열분해시키는 열분해 반응부, 열분해 반응 중 생성된 기상물을 미분형 반응기로부터 채취할 수 있는 시료가스채취부, 열분해 반응부의 온도를 측정하여 일정 열분해온도로 유지시키고 각종 구동장치를 통합적으로 제어하기 위한 전기제어부로 구성되어 있다.

미분형 반응기의 온도는 알칼리 금속계 용융염을 이용하여 원하는 온도까지 상승시켰으며, 알칼리 금속계 용융염은 질산칼륨과 질산칼슘을 무게비로 56 : 44로 혼합하여 제조하였다.

미분형 열분해반응기는 원통형으로 하부는 밀폐되어 있으며 상부는 시료주입, 반응생성물 채취가 용이한 나사형이다. 반응기의 크기는 직경 25.4cm, 길이 15.5cm이며 용량은 40ml이다. 미분형 반응기의 액상생성물의 탄소수 분포는 비등점 분포를 이용하여 측정하였으며 상기의 방법은 HP5890 GC를 이용한 ASTM D2887방법에 의거 모사증류하여 끓는점의 분포를 측정한다 다음 HP사에서 제공하는 탄소수와 끓는점 간의 자료를 이용하여 액상 생성물의 탄소수분포를 측정하였다. 열분해 기상 생성물은 GC(Varian, CP-3800, HP-1 column, FID)을 이용하여 분석하였다.

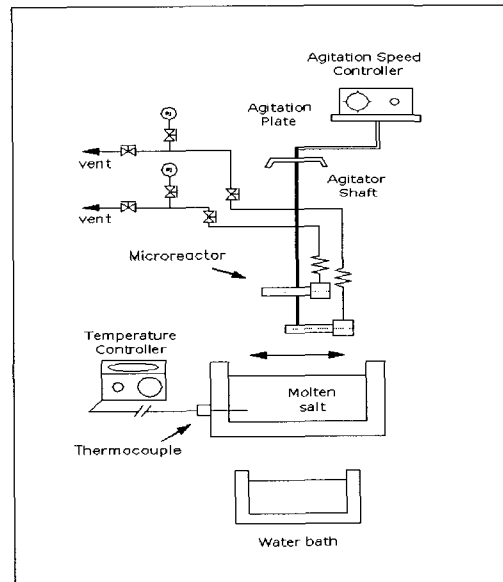


그림 1. 열분해 실험장치의 개략도

2.2 실험방법

미분형 반응기에 플라스틱 시료 10g을 주입한 후 용융 염이 적정 열분해온도에 도달하면 열분해반응기를 용융 염에 잠기게 하여 열분해실험을 실시하였다. 열분해 반응 온도는 410 ~ 450℃로 다양하게 변경하였다. 반응기는 회분식 반응기내 용융된 PP와 PS 플라스틱이 원활히 혼합될 수 있도록 충분한 속도로 구동시켰으며 구동속도는 왕복 60회전이었다. 열분해반응기의 무게는 최종적으로 반응기내 잔존한 고형잔류물의 무게를 파악하기 위해 각 실험마다 실험전후로 매번 측정하였다.

열분해반응이 완료된 후 반응생성물의 수율을 측정하기 위해 n-hexane을 추출용매로 사용하여 추출하였으며, 추출장치는 Millipore사의 압력여과장치(Cat. No. : YT30 142 HW)로써 필터직경이 142mm이고 기공직경은 0.45μm이었다.

분자량분포 자료로부터 moment를 얻었으며 moment는 continuous distribution theory에 적용하여 열분해 속도를 해석하였다.

PP와 PS시료의 화학적 특성을 조사하기 위하여 공업 분석 및 원소분석(CHN-1000 Elemental Analyzer, LECO)을 실시하였으며 결과를 <표 1>에 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 사용된 플라스틱은 대부분 탄소와 수소로 구성된 휘발분으로 이루어져 있음을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열적특성곡선을 이용한 열분해 해석

상온에서 열분해 종료온도인 700℃까지 2℃/min의 승온속도로 PP와 PS의 열분해를 수행하여 각각 <그림 2>와 <그림 3>에 나타내었다.

PP의 동적 열분해특성을 나타낸 <그림 2>에서 PP에 일부 포함된 저분자량 물질의 휘발에 의해 300℃ 근처부터 열분해가 시작된 후 주쇄 및 사슬의 분해가 시작되는 350℃부터는 급격한 무게감소가 일어나며, 모든 초기의 고분자 물질이 소멸된 450℃ 부근에서 열분해가 종료됨을 알 수 있다. 일반적으로 PE계 고분자의 경우 약 350℃에서 열분해가 시작되어 480℃ 부근에서 열분해가 종료

되는데, PE계와 비교시 약 30~50℃정도 낮은 온도에서 열분해시작 및 종료됨을 알 수 있다. 이는 PE와 PP가 불규칙 분해에 의해 저분자화되는 과정은 동일하나 PP는 PE와는 달리 4개의 수소 중 하나의 수소가 메틸기로 치환된 구조를 이루어 열에 의한 주쇄 또는 사슬의 열분해가 보다 더 활발하게 일어나기 때문이다[11].

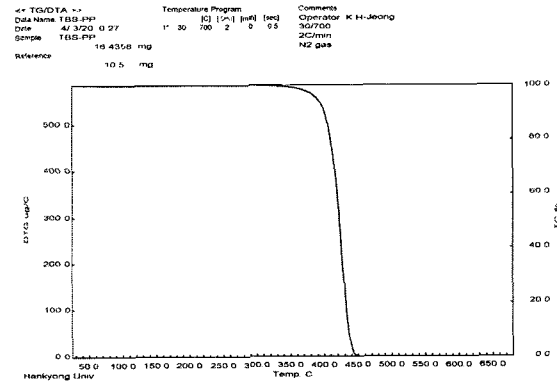


그림 2. PP의 동적 열분해 특성 곡선

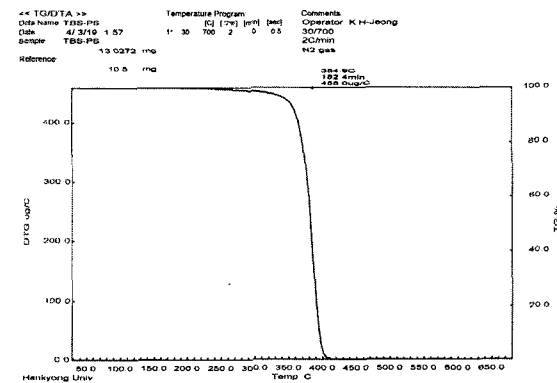


그림 3. PS의 동적 열분해 특성 곡선

<그림 3>은 PS의 동적 열분해특성을 나타낸 것으로서 250℃ 근처부터 일부 포함된 저분자량 물질의 휘발에 의해 무게가 감소하기 시작한 후 330℃부터는 해중합반응의 시작으로 인해 급격한 무게감소가 일어나고 초기 고분자물질이 소멸된 450℃ 부근에서 열분해가 종료됨을 보

표 1. PP와 PS의 공업 및 원소분석

(단위:wt%)

	Proximate analysis				Ultimate analysis				
	Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulfur
PP	0.02	99.96	0.02	0.00	83.72	12.55	0.02	3.707	0.003
PS	0.02	99.98	0.00	0.00	89.46	7.54	0.02	2.977	0.003

여주고 있다. PP의 동적 열분해특성곡선과 비교해 볼 때 전체적으로 PP보다 약 30~50℃ 낮은 온도에서 열분해가 이루어짐을 알 수 있다. 이는 PS의 경우 방향족 화합물이 치환된 구조를 가지고 있어 불규칙 분해가 일어나는 PP와는 달리 쉽게 반응이 일어나는 해중합에 의해 분해되기 때문이다.

열중량 분석기로부터 얻을 수 있는 동적 열분해 특성곡선은 페플라스틱 열분해공정에 있어 중요한 공정변수 중의 하나인 열분해온도에 대한 정보를 제공해 준다. 그러나 열분해특성곡선은 비교적 빠른 시간에 열분해온도에 대한 개략적인 공정조건을 제시해주나 경제성 분석에 중요한 자료인 열분해시간에 따른 액상 및 기상생성물의 수율과 조성에 대한 정보를 제공해 주지 못하는 단점이 있다[7]. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 10g 내외의 시료를 사용하여 열분해 조건별 고상, 액상 그리고 기상 생성물의 수율과 조성을 제공해주는 미분형 반응기를 이용한 실험을 병행하였다.

3.2 열분해생성물의 생성 및 분포 특성

5대범용 플라스틱인 PP와 PS의 재활용율을 향상시키기 위하여 불순물 또는 다른 종류의 플라스틱이 포함되어 있는 경우 상당히 경제적인 방법인 저온 열분해공정의 반응특성에 대해 회분식 미분형 반응기를 이용하여 연구하였다. 먼저 저온 열분해반응에서 중요한 공정변수인 반응온도와 시간의 영향을 고찰하였으며, 각 반응조건에서 생성된 고상, 액상, 기상 생성물의 수율, 조성 그리고 탄소수분포의 측정을 통해 얻어진 자료를 이용하여 열분해특성을 해석하고자 하였다. 이러한 결과는 향후 상용규모의 페플라스틱 열분해장치의 설계제작에 필요한 기초자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

<그림 4>는 410℃와 450℃의 반응온도에서 반응시간에 따른 PP 열분해 생성물의 수율변화를 나타낸 그림이다. 먼저 반응온도 및 시간에 대한 열분해 고상 잔류물의 수율변화를 살펴보면 열분해온도 410℃와 450℃ 공히 반응시간을 1시간 이상 유지시키면 반응기 내의 PP는 대부분 열분해되어 고상잔류물이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.

반응시간에 따른 액상 생성물의 수율변화에 있어 최대 수율을 나타내는 60분 이후부터는 반응시간이 증가할수록 액상생성물의 수율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 동일한 반응시간에서 반응온도가 증가할수록 액상생성물의 수율은 감소함을 나타내었다. 열분해온도 410℃에서 1시간 열분해시킬 경우 약 92%의 액상생성물을 얻을 수 있으나 3시간 열분해시킬 경우 약 80%의 액상생성물이 얻어짐을 알 수 있다. 410℃에서 3시간 열분해

시킬 경우 액상 생성물의 수율은 약 80%이었으나 보다 높은 온도인 450℃에서 3시간 열분해시킬 경우 액상생성물의 수율은 약 65%이었다.

상기와 같은 결과는 밀폐된 열분해 반응기에서 반응온도와 시간이 증가함에 따라 일부 액상열분해 생성물들은 상호간의 재중합반응을 통해 보다 큰 고분자물질로 전환되기도 하나 대부분의 액상 용융고분자물질들은 분해반응이 촉진되어 훨씬 작은 분자량을 갖는 물질로 전환되기 때문이다[5].

반응시간 및 반응온도 증가에 따라 저분자량 물질의 생성이 보다 촉진된다는 결과는 반응온도와 시간에 따른 기체생성물의 수율변화 결과로부터 확인할 수 있다. 그림에서 기상 생성물의 수율은 열분해시간과 온도가 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 410℃에서 2시간 열분해시킬 경우 기상 생성물은 약 12%이나, 450℃에서 2시간 열분해시킬 경우 410℃의 경우보다 약 2배가량 증가한 24%의 기상생성물 수율이 얻어졌다.

<그림 5>는 PS의 열분해에 의해 생성된 각 생성물의 수율변화를 반응온도와 시간에 따라 나타낸 그림이다. 반응온도 및 시간에 따른 열분해 고상 잔류물의 수율변화는 PP에서와 유사하게 반응온도에 관계없이 반응시간이 1시간 이상 유지되면 반응기내의 PS는 대부분 열분해되어 고상 잔류물이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 반응시간 및 반응온도 증가에 따른 액상 생성물 수율변화는 PP의 경우와는 상당히 다른 형태를 보여주고 있는데, 그림에서 반응온도와 반응시간이 증가하여도 액상 생성물의 수율변화는 미미한 수준인 것으로 나타났다.

410℃에서 1시간 열분해시킬 경우 액상 생성물의 수율은 약 99%이며, 동일한 온도에서 3시간 열분해시킬 경우 액상 생성물의 수율은 약 1% 감소한 98% 이었다. 450℃온도에서 반응시간을 3시간 유지시켜 열분해한 경우 액상 생성물의 수율은 410℃온도에서 열분해시킨 경우보다 약 1% 감소한 97% 이었다.

상기의 결과로부터 PS는 PP의 경우와는 달리 열분해온도와 시간이 증가하여도 고상 잔류물이나 기상 생성물이 거의 생성되지 않고 대부분 액상 생성물로 전환됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 반응온도와 시간에 대한 기상생성물의 수율변화로부터 확인할 수 있다.

그림에서 반응온도와 시간이 증가하여도 기상생성물의 수율증가는 미미한 수준임을 알 수 있는데, 본 실험조건 중에서 가장 격렬한 열분해조건인 450℃에서 3시간 열분해시켜도 기상생성물의 수율은 약 2.5% 이었다.

PP의 경우에는 측쇄형 결합구조를 가져 열에 의해 다음과 같은 무작위 절단에 의한 일련의 개시, 성장, 절쇄, 정지반응이 일어나 고분자물질이 저분자물질로 전환되

며, 아울러 Dials-Alder반응도 일어나 고리형 화합물이 생성되기도 한다. 이러한 이유로 인해 PP의 경우 반응온도와 시간이 증가할수록 무작위 절단반응의 촉진에 의해 액상 생성물의 생성, 기상 생성물의 전환도 보다 활발히 일어나며, 또한 Dials-Alder반응도 촉진되어 고리형 화합물도 훨씬 많이 생성된다. 생성된 고리형 화합물은 상당부분 축합 및 재결합반응 등을 걸쳐 coke로 전환된다 [14].

PS의 경우 PP와는 달리 해중합반응에 의해 고분자물질이 저분자물질로 전환되며 저분자물질은 거의 대부분 액상물질인 styrene monomer, dimer, trimer로 구성되어 있다.

따라서 PS의 경우 반응온도와 시간이 증가할수록 해중합반응이 촉진되어 styrene monomer, dimer, trimer의 순서로 액상생성물이 얻어진다.

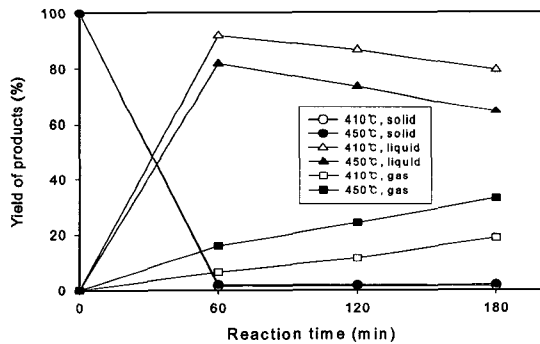


그림 4. 반응온도 및 시간에 따른 PP 열분해 생성물의 수율변화

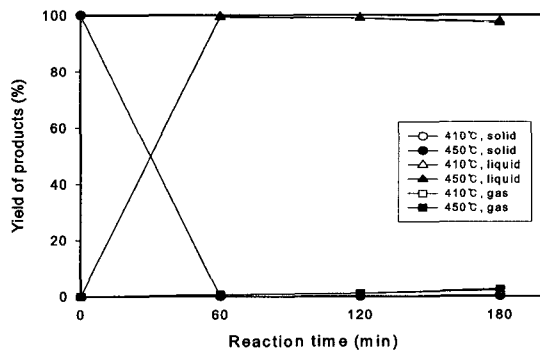


그림 5. 반응온도 및 시간에 따른 PS 열분해 생성물의 수율변화

열분해반응 중에 생성된 PP의 기상 생성물의 조성을 <표 2>에 나타내었다.

표 2. PP의 열분해 기상생성물의 조성

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	Total
PP	20.0%	23.2%	34.8%	15.1%	6.9%	100%

표 2에서 프로판의 함량이 34.8%로 가장 높으며 그 다음으로 에탄 그리고 메탄의 순이며, 탄소수 3개 이하(프로판, 에탄, 메탄)인 가스의 함량은 전체의 78%를 차지함을 알 수 있다.

<그림 6>과 <그림 7>에 열분해반응에서 중요한 반응변수 중의 하나인 반응시간에 대한 액상 생성물의 조성변화를 나타내었다.

450°C의 동일한 열분해 온도에서 반응시간을 1시간과 3시간으로 변화시켰을 때 PP 액상 생성물의 탄소수에 따른 질량분포를 <그림 6>에 나타내었다. 동일한 온도에서 반응시간을 증가시킬 경우 비교적 탄소수가 적은 물질의 생성이 증가하는 경향을 보였다. 450°C에서 1시간 열분해시킬 경우 비교적 탄소수가 큰 탄소수 25개 이상을 갖는 물질이 넓은 탄소수 범위에서 생성되나, 450°C에서 3시간 열분해시킬 경우 탄소수 25개 이상을 갖는 물질은 거의 생성되지 않았다. 또한 경유수준의 액상물질인 탄소수 20 이하의 물질은 반응시간이 증가할수록 뚜렷하게 증가함을 보이고 있다. 상기의 결과로부터 동일한 반응 온도에서 반응시간이 증가할수록 고분자물질이 저분자물질로 전환되며, 이로 인해 액상 생성물의 품질이 일부 향상됨을 알 수 있다.

410°C의 동일한 열분해온도에서 반응시간을 1시간과 3시간으로 변화시켰을 때 PS 액상 생성물의 탄소수에 따른 질량분포를 <그림 7>에 나타내었다.

PS의 경우 반응시간을 증가시켰을 때 전반적으로 탄소수가 적은 물질의 생성이 증가하는 경향을 보이며, 특히 탄소수 8개, 16개, 24개를 갖는 물질의 생성이 뚜렷하게 증가하였다. 여기서 탄소수가 8개인 물질은 styrene monomer, 탄소수가 16개인 물질은 styrene dimer, 탄소수가 24인 물질은 styrene trimer이다.

410°C에서 1시간 열분해시킬 경우 탄소수 38개인 물질이 일부 생성되나 열분해시간을 3시간으로 연장시킨 경우 탄소수 38개 이상인 물질은 대부분 소멸됨을 알 수 있었다.

상기의 결과로부터 PS는 해중합반응을 통해 고분자물질이 저분자물질로 열분해되며, 주 생성물은 styrene monomer, styrene dimer, styrene trimer이고, 반응시간이 증가할수록 styrene monomer로의 전환이 가장 활발하게 진행됨을 알 수 있었다.

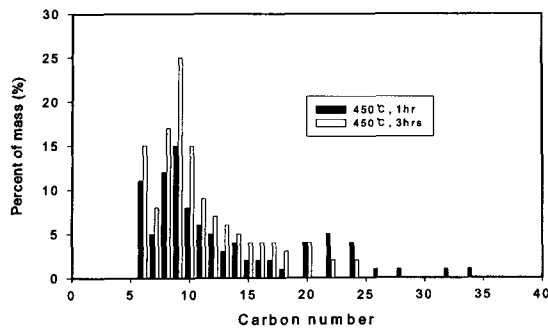


그림 6. 반응시간에 따른 PP 액상 생성물의 탄소수 분포

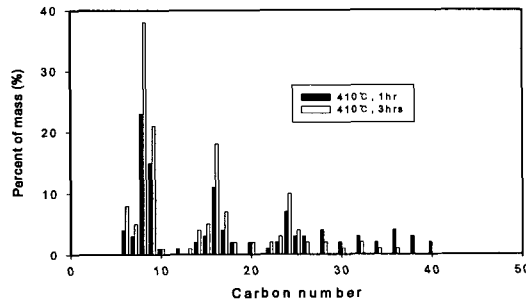


그림 7. 반응시간에 따른 PS 액상 생성물의 탄소수 분포

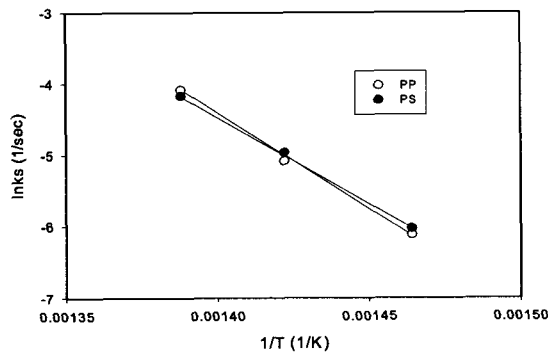


그림 8. PP와 PS의 Arrhenius plot

<그림 8>은 열분해 반응 중 말단절단반응, mass balance 그리고 continuous moment balance식으로부터 얻은 Kodera 등 [7]이 제안한 다음의 식을 이용하여 말단절단 속도계수 k_s 를 얻은 후 이를 Arrhenius plot한 그림이다.

$$dP_m^{(1)}/dt \cong -k_s P_m^{(1)}$$

PP와 PS의 활성화에너지를 직선의 기울기로부터 얻었으며 각각의 활성화에너지 값은 50.0, 45.2 kcal/mole 이었다. 활성화에너지 값은 Wu등[15]이 PP를 대상으로 구한 활성화에너지 값 43.8 kcal/mole과 PS를 대상으로 구한 값 41.2 kcal/mole 보다 약간 높게 나타났다.

4. 결론

1. 열중량 반응기로부터 얻은 PP와 PS의 동적 열분해 특성곡선의 분석을 통해 PS가 PP보다 약 30~50°C 낮은 온도에서 열분해가 일어남을 알 수 있었다.
2. 회분식 미분형 반응기를 이용한 열분해 반응에서 PP의 경우 반응온도와 시간이 증가할수록 액상 생성물의 수율은 감소하나 기상생성물의 수율은 증가하는 경향을 보였으며, PS의 경우 반응온도와 시간이 증가할수록 해중합이 촉진되어 styrene monomer, dimer, trimer의 순서로 액상 생성물이 얻어짐을 알 수 있었다.
3. Arrhenius plot으로부터 얻은 PP와 PS의 활성화에너지 (E_a)는 각각 50.0, 45.2 kcal/mole이었다.

사용부호

k_s : 말단절단속도계수

P_m : 폴리머 용체의 분자량모멘트

참고 문헌

- [1] 한국재활용협회 통계자료, 2005.
- [2] 환경통계연보, 2006.
- [3] 김영성·선도원·이영우·손재익, “고분자폐기물의 열분해 처리”, 화학공업과 기술, 제4권, 제3호, pp.238-248, 1994.
- [4] Y. Liu, J. Qian and J. Wang, “Pyrolysis of polystyrene waste in a fluidized-bed reactor to obtain styrene monomer and gasoline fraction”, Fuel Processing Technol., 63, pp. 45-54, 2000.
- [5] 김승수·전병화·박찬진·윤왕래·김성현 “회분식 반응기에서 polystyrene의 열분해 반응 특성”, 화학공학, 제38권, 제5호, pp.732-738, 2000.
- [6] 차왕석, “폴리에틸렌의 열분해 kinetics”, 공업화학, 제10권, 제3호, pp. 432-437, 1999.

- [7] Y. Kodera and B. J. McCoy, "Distribution kinetics of plastics decomposition", J. Jpn. Petro. Inst, 46, pp. 155-165, 2003.
- [8] A. S. Naime, W. S. Cha, J. M. Smith and B. J. McCoy, "Polyethylene pyrolysis: theory and experiments for Molecular-Weight-Distribution kinetics", Ind. Eng. Chem. Res., 37, pp. 2582-2591, 1998.
- [9] H. A. Schneider, "Survey and critique of thermo-analytical methods and results," Degradation and stabilization of polymers volume 1, Jellinek H. H. G.(Eds.), Elsevier Science Publishing Co., New York, pp. 506-526, 1983.
- [10] G. Madras, J. M. Smith and B. J. McCoy, "Degradation of poly-(methyl methacrylate) in solution," Ind. Eng. Chem. Res., 35, pp. 1795-1804, 1996.
- [11] Y. Ishihara, H. Nanbu, T. Ikemura and T. Takesue, "Catalytic decomposition of polyethylene using a tubular flow reactor system," Fuel, 69, pp. 978-988, 1990.
- [12] R. W. J. Westerhout, J. Qaanders, J. A. M. Kuipers and W. P. M. van Swaaij, "Kinetics of the low-temperature pyrolysis of polyethene, polypropene, and polystyrene modeling, experimental determination, and comparison with literature models and data," Ind. Eng. Chem. Res., 36, pp. 1955-1964, 1997.
- [13] M. Wang, J. M. Smith and B. J. McCoy, "Continuous kinetics for thermal degradation of polymer in solution," AIChE J., 41, pp. 1521-1533, 1995.
- [14] Y. Ishihara, H. Nanbu and K. Saido, "Back biting reactions during the catalytic decomposition of polyethylene," Bull. Chem. Soc. Jpn., 64, pp. 3585-3592, 1991.
- [15] C. Wu, C. Chang, J. Hor, S. Shih, L. Chen and F. Chang, "On the thermal treatment of plastic mixtures of MSW:pyrolysis kinetics", Waste Manage, 13, pp. 221-235, 1993.

김 상 훈(Sang-Hoon Kim)

[정회원]



- 1986년 2월 : 호원대학교 경제학과 (경제학사)
- 2004년 2월 : 군산대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 군산대학교 환경공학과 박사과정수료
- 1985년 3월 ~ 현재 : 정환 건설 대표이사

<관심분야>

폐기물처리, 소규모 하수처리

장 현 태(Hyun-Tae Jang)

[정회원]



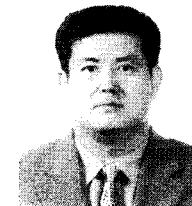
- 1986년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학사)
- 1991년 8월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 부교수

<관심분야>

흡착, 유동층반응

차 왕 석(Wang-Seog Cha)

[정회원]



- 1981년 8월 : 고려대학교 화학공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학교 토목환경공학부 교수

<관심분야>

폐기물 가스화 및 열분해