

## ABS계 플라스틱의 저온열분해 및 액상생성물 분포 특성

차왕석<sup>1</sup>, 장현태<sup>2\*</sup>

### Characteristics of low temperature pyrolysis and liquid product distribution of ABS plastics

Wang-Seog Cha<sup>1</sup> and Hyun-Tae Jang<sup>2\*</sup>

**요약** 열중량반응기와 미분반응기를 이용하여 ABS의 열분해 및 생성물분포 특성을 연구하였으며 미분반응기를 이용한 실험의 열분해온도는 400 ~ 450℃이었다. 각 상의 열분해생성물의 수율은 무게측정을 통해 얻었으며 액상생성물의 탄소수분포는 GC-SIMDIS 방법을 통해 측정하였다. 열중량분석실험에서는 측정할 수 없었던 다량의 고상잔류물의 생성을 회분식 미분반응기실험을 통해 확인할 수 있었다. 반응온도와 시간이 증가할수록 액상생성물의 수율과 평균분자량은 감소하였으나 액상생성물 중의 스티렌모노머의 생성은 두드러지게 증가하였다. ABS 열분해 반응에서 말단절단의 속도계수인 활성화에너지 값은 54.1 kcal/mole이었다.

**Abstract** Characteristics of pyrolysis and liquid product distribution of ABS plastics have been studied in the thermogravimetric(TG) reactor and bomb microreactor. Pyrolysis reactions were performed at temperature 400~450℃ and yield of each pyrolytic product was obtained by the weight measurement method. The molecular weight distributions of liquid products were determined by the GC-SIMDIS method. It was observed that solid residue which could not be detected in the thermogravimetric experiments was significantly formed in the batch-type microreactor. It was found that the yield and average molecular weight of liquid products were decreased with the increase of reaction temperature and time, but the formation of styrene monomer was significantly increased. The chain-end scission rate parameters were determined to be 54.1 kcal/mole for ABS by the Arrhenius plot.

**Key Words** : ABS, TG, microreactor, liquid product, pyrolysis

### 1. 서론

플라스틱은 낮은 열 및 전기전도성을 가지고 있으며 가볍고 내구성이 뛰어난 다양한 물질로 쉽고 값싸게 제조할 수 있어 광범위하게 사용되고 있다. 이와 같은 사용상의 장점으로 인해 플라스틱 소비가 점차 증가하나 아직까지 마땅한 처리방법이 없어 상당량이 단순 소각이나 매립처분되고 있으며, 단순소각처리의 경우 다이옥신 등의 2차 오염물 발생, 매립처분의 경우 높은 난분해성으로 인해 안정화 저해 등의 환경적인 문제를 야기시키고 있다.

유기물질과 에너지 함량이 높은 폐플라스틱을 사용가능한 에너지원으로 전환할 수 있으면 에너지원의 절약과 폐기물처리비용을 절감할 수 있어 국내외적으로 폐플라스틱의 에너지자원화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. 폐플라스틱을 재자원화하는 방법에는 물질재활용과 화학적재활용 방법이 있으며 물질재활용은 주로 순수하게 분리된 플라스틱이 주 대상이어서 적용에 한계가 있으나, 화학적 재활용방법에는 PMMA(poly methylmethacrylate), PS(polystyrene), PTFE(polytetrafluoroethylene) 등을 열분해시켜 모노머 형태의 원료물질로의 회수[5,6], PE(polyethylene) 등을

본 논문은 산자부의 표준화기술개발사업 연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

<sup>1</sup>군산대학교 토목환경공학부

<sup>2</sup>한서대학교 화학공학과

\*교신저자 : (htjang@hanseo.ac.kr)

접수일 08년 3월 7일

수정일 08년 6월 15일

게재확정일 08년 8월 11일

분해하여 저분자 형태의 액체연료화[7,8], polyester와 polyamide를 강산 또는 강알칼리 조건에서 가수분해시켜 원료물질로의 회수하는 방법[9] 등이 있으며 이중에서 액체연료화 방법은 PE 등 올레핀계를 포함한 다양한 플라스틱에 거의 제한없이 폭넓게 적용될 수 있어 가장 활발하게 연구되고 있으나 코크와 왁스 등의 생성, 높은 에너지 소모, 반응물간의 상호반응에 의한 저급생성물의 생성, 낮은 생산성 등과 같은 해결해야 할 기술적인 문제점이 있다. 액상연료를 제조하는 저온열분해 공정에서 나타나는 다양한 기술적인 문제를 해결하기 위해서는 액상생성물을 중심으로 한 각 생성물의 수율, 조성, 평균분자량 그리고 분자량분포를 포함한 열분해특성 및 반응속도에 관한 연구가 필요하다. 올레핀을 포함한 다양한 종류의 플라스틱 열분해반응은 주쇄 및 측쇄가 불규칙하게 분해되며 다양한 종류와 크기를 갖는 라디칼이 생성되어 결합의 무작위 절단과 분해된 일부 생성물간의 재조합이 일어나는 라디칼 반응이며 이러한 라디칼 반응은 다양한 크기 및 분포를 갖는 생성물이 얻어진다[10,11]. 열분해반응의 속도론 연구에 주로 이용되고 있는 방법은 열중량분석곡선을 이용하는 방법[12]과 생성물의 분자량분포곡선을 이용하는 방법[13]을 들 수 있다. 무게변화를 통한 열분해특성을 비교적 간편하고 신속하게 처리할 수 있다는 장점으로 인해 열중량분석법이 가장 널리 이용되거나 열중량분석기의 특성상 수 mg 정도의 시료만이 주입되어 분해과정 중의 반응메카니즘, 주생성물인 액상생성물의 조성 및 수율 등에 관한 자료를 제공하지 못하는 문제점이 있다. 미분반응기의 각 열분해 생성물의 분자량분포곡선을 이용하는 방법은 각 반응조건에 대한 생성물의 분자량분포에 대한 자료와 분자량분포로부터 얻은 평균분자량, 0차 모멘트, 1차 모멘트에 대한 자료를 얻음으로써 저온열분해반응 및 생성물 생성특성 그리고 반응속도를 해석할 수 있다[14].

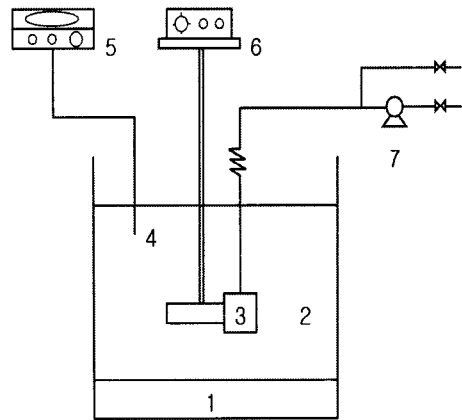
따라서 본 연구에는 ABS를 대상으로 회분식 미분반응기를 사용하여 열분해반응 중 생성되는 액상과 기상생성물의 수율, 조성 그리고 분자량분포를 포함한 열분해특성을 조사하였으며, 또한 각 반응조건별 기상생성물 수율과 액상생성물의 탄소수 분포결과를 연속분포속도식에

적용하여 열분해반응의 속도론적 연구도 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

ABS의 열적특성곡선은 열중량분석기(Setaram사, TG 92)를 이용하여 얻었다. 4개의 미분반응기가 설치된 열분해실험장치를 이용하여 액상생성물을 비롯한 각 생성물의 수율과 조성을 얻었으며, 실험장치의 개략도는 <그림 1>과 같다.



- 1. 가열히터
- 2. 용융염반응조
- 3. 미분반응기
- 4. 온도계
- 5. 온도조절
- 6. 구동속도조절기
- 7. 진공펌프

[그림 1] 열분해 실험장치의 개략도

실험장치는 가열 및 냉각부, 열분해반응부, 시료가스 채취부, 전기제어부로 구성되어 있으며, 알칼리 금속계 용융염을 사용하여 미분반응기를 원하는 열분해온도까지 상승시켰으며 알칼리 금속계 용융염은 질산칼륨과 질산칼슘으로 구성되어 있으며 구성비는 무게비로 56 : 44이

[표 1] LDPE, PS 그리고 ABS 플라스틱의 공업 및 원소분석

(단위 : wt%)

	Proximate analysis				Ultimate analysis				
	Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulfur
LDPE	0.04	99.93	0.03	0.00	83.67	12.46	3.82	0.05	0.00
PS	0.05	99.95	0.00	0.00	89.88	7.21	2.89	0.02	0.00
ABS	0.85	98.65	0.00	0.50	85.01	8.54	2.90	3.51	0.04

었다[15]. 4개의 미분반응기는 동일한 크기이며 반응기의 제원은 직경 2.54cm, 길이 15.5cm, 용량 40ml이다. 액상 생성물의 각 탄소수에서의 무게분포는 기체크로마토그래프를 사용한 ASTM D2887방법에 따라 모사증류하여 끓는점 분포를 측정된 다음 HP사에서 제공한 탄소수와 끓는점 간의 자료를 이용하여 얻었다. 기상생성물의 조성은 기체크로마토그래프(Varian, CP-3800, HP-1 Colum, FID)를 이용하여 분석하였다.

### 2.2 실험방법

10g 내외의 ABS플라스틱 시료를 4개의 미분반응기에 주입한 후 용융염 반응조의 온도가 적정 열분해온도에 도달하면 미분반응기를 용융염에 잠기게 한 후 반응물이 원활히 혼합될 수 있도록 전후방향으로 분당 60회전의 속도로 구동시켰다. 열분해반응 종료 후 각 생성물의 수율을 파악하기 위해 각 실험마다 실험 전후로 미분반응기의 무게를 측정하였다. 또한 반응기내 잔류물을 노르말 헥산으로 추출하는 방법으로 액상생성물의 수율과 탄소수에 따른 무게분율을 측정하였으며 추출장치는 Millipore사의 압력여과장치이며 사용필터의 제원은 직경 12cm, 기공직경 0.45 $\mu$ m이었다. 탄소수에 대한 질량분포 곡선으로부터 0차, 1차 모멘트를 얻었으며, 얻어진 모멘트를 연속분포이론에 적용하여 열분해반응 kinetics를 해석하였다. ABS플라스틱 시료의 화학적 특성을 조사하기 위하여 공업분석과 원소분석(CHN-1000, Elemental Analyzer, LECO)을 실시하였으며 분석결과는 <표 1>에 나타내었다. ABS플라스틱은 회분과 질소성분이 거의 존재하지 않는 것으로 알려진 PE계 또는 PS계 플라스틱과는 달리 약 0.5wt%의 회분과 2.9wt%의 질소성분이 포함되어 있으며 약 9,900kcal/kg의 발열량을 갖는 것으로 나타났다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 열중량분석법을 이용한 열분해특성 해석

<그림 2>는 2 $^{\circ}$ C/분의 속도로 승온되는 질소분위기의 열중량분석기에서 얻은 ABS플라스틱의 열적무게감량곡선을 PS와 LDPE플라스틱의 열적무게감량곡선과 비교한 그림이다.

그림에서 PS플라스틱의 경우 350 $^{\circ}$ C부터 해중합반응의 시작으로 급격한 무게감량이 일어나고 약 410 $^{\circ}$ C에서 열분해가 종료되는 형태, LDPE 플라스틱의 경우 410 $^{\circ}$ C에서 활발한 불규칙 절단이 일어나 470 $^{\circ}$ C에서 분해반응

이 종료되는 형태, 즉 단지 약 60 $^{\circ}$ C의 온도차를 제외하고 유사한 형태의 무게감량곡선을 보이고 있다.

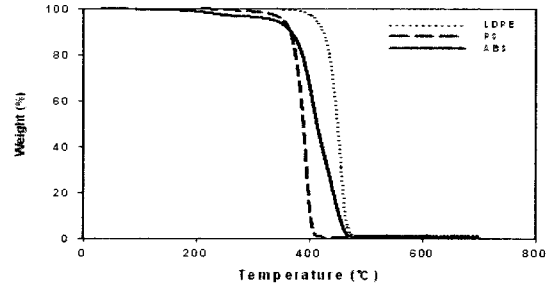


그림 2. LDPE, PS 그리고 ABS 플라스틱의 열적무게 감량곡선

이에 반해 ABS플라스틱의 경우 약 350 $^{\circ}$ C부터 열분해반응에 의해 심한 무게감량 현상이 발생하여 465 $^{\circ}$ C에서 열분해가 종료되어 초기 주입고분자가 소멸되는 형태의 무게감량곡선을 보이고 있다.

그리고 각 플라스틱의 열적특성곡선에서 가장 활발하게 열분해가 일어나는 구간의 기울기, 즉  $dW/dT$ 를 구하여 상호비교한 결과를 <표 2>에 나타내었다.

[표 2] PS, LDPE 그리고 ABS 플라스틱 열적특성곡선의 기울기( $dW/dT$ )

	PS	LDPE	ABS
$dW/dT(mg/^{\circ}C)$	0.244	0.242	0.092

PS와 LDPE플라스틱의 기울기는 약 0.24이나 ABS플라스틱의 기울기는 0.09일 정도로 상당히 작은 값을 알 수 있다. 이는 ABS 플라스틱의 경우 물질특성상 styrene, butadiene, acrylonitrile 모노머로 이루어져 있으며 이 중에서 acrylonitrile 모노머는 열저항성, 화학적 저항성이 뛰어나 열분해 과정 중에 가교 및 축합반응이 촉진되어 다른 모노머보다 고온에서 열분해가 일어나 PS와 LDPE 플라스틱의 경우보다 훨씬 넓은 온도범위에서 낮은 속도로 분해가 일어나기 때문이다[16].

열중량특성곡선은 간편하고 빠르게 열분해공정에서 중요한 공정변수 중의 하나인 열분해온도에 대한 정보를 제공하나 열분해 공정의 scale-up, 경제성분석 등에 필요한 각 공정변수에 대한 각 생성물의 수율, 조성 등에 관한 실질적인 중요한 자료를 제공해 주지 못하는 문제점이 있다.

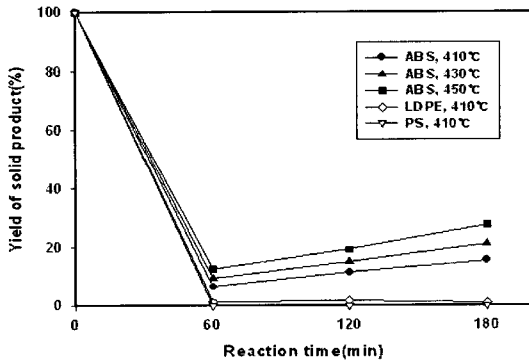
따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 열분해 반응조건별 각 생성물의 수율, 조성, 그리고 분자량변화를 제공

해주는 미분반응기를 이용한 열분해실험을 병행하였다

### 3.2 저온 열분해 및 액상성생물 분포 특성

PE 또는 PS계 플라스틱처럼 순수하게 분리수거되어 물질재활용 등의 방법으로 재활용되는 경우와는 달리 주로 여러 플라스틱성분과 혼합되어 배출되는 ABS계 플라스틱의 재자원화율을 증가시키기 위하여 이물질 또는 여러 종류의 플라스틱이 혼합되어 있는 경우 경제적인 방법인 저온 열분해공정의 반응특성에 대해 밀폐형 미분반응기를 이용하여 연구하였다.

먼저 ABS계 플라스틱의 저온 열분해반응에서 중요한 공정변수인 반응온도와 시간에 대한 영향을 라디칼반응에 의해 열분해되는 LDPE계, 그리고 해중합에 의해 열분해되는 PS계의 경우와 비교·고찰하였으며[15,17], 아울러 각 열분해 조건에서 생성된 고상, 액상, 기상생성물 수율 그리고 액상생성물 탄소수분포의 측정을 통해 열분해 및 생성물 분포 특성을 해석하고자 하였다.



[그림 3] 열분해온도와 시간에 따른 LDPE, PS 그리고 ABS 플라스틱의 고상잔류물의 수율변화

<그림 3>은 반응온도에 대한 ABS의 열분해 고상잔류물의 수율변화를 410°C에서 열분해한 LDPE와 PS의 경우와 비교한 그림이다.

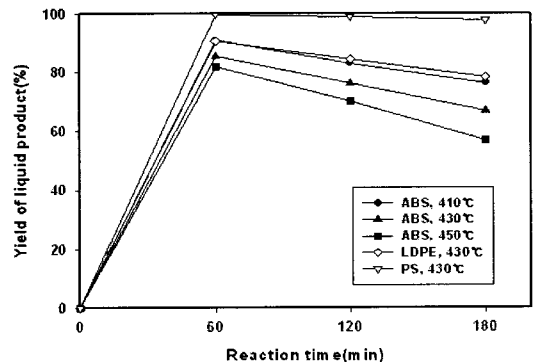
먼저 LDPE와 PS의 반응시간에 대한 고상 잔류물의 수율변화를 살펴보면 두 경우 공히 반응시간을 1시간 이상 유지시키면 반응기내의 LDPE와 PS는 거의 대부분 열분해되어 고상잔류물이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. ABS의 경우 410°C 이상의 온도에서 반응시간을 1시간 이상 유지하면 반응기내 분해 가능한 ABS는 대부분 열분해되나, LDPE와 PS계와는 달리 반응온도와 시간이 증가할수록 거의 코크로 추정되는 고상잔류물의 증가가 뚜렷하였다. 열분해온도 410°C에서 3시간 열분해시킬 때 LDPE의 경우 약 2 wt%의 고상잔류물, PS의 경우 약 1

wt%의 고상잔류물, ABS의 경우 18 wt%의 고상잔류물이 얻어짐을 알 수 있다. ABS계 플라스틱의 코크생성 증가 원인은 열분해 반응에서 acrylonitrile 단위구조는 반응기의 주 재질인 철계 촉매 하에서 반응온도와 시간의 증가에 따라 가교 및 탄화반응이 촉진되기 때문이다[16].

여기서 열분해가 활발하게 일어나는 반응조건에서 약 10g 내외의 플라스틱을 대상으로 미분반응기에서 실험한 결과는 수 mg의 시료를 사용하여 얻은 열적감량곡선에서의 결과와 상당히 차이를 알 수 있다. 즉 그림 2의 열적감량곡선의 결과에서는 열분해 종료 후 고상잔류물이 거의 생성되지 않으나 미분반응기를 사용한 열분해실험에서는 반응 종료 후 다량의 고상잔류물이 생성되며 고상잔류물은 반응온도와 시간이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터 열중량반응기를 이용한 열분해 해석에서는 단지 열분해온도에 대한 정보만 제공해주며 실제적인 열분해 공정조건을 확립하고자 할 때는 각 생성물의 수율과 조성을 제공해 주는 미분반응기를 이용한 열분해특성 실험이 동시에 이루어져야 함을 알 수 있다.

반응온도에 따른 ABS의 액상성생물 수율변화를 LDPE와 PS의 경우와 비교하여 <그림 4>에 나타내었다.



[그림 4] 열분해온도와 시간에 따른 LDPE, PS 그리고 ABS 플라스틱의 액상성생물의 수율변화

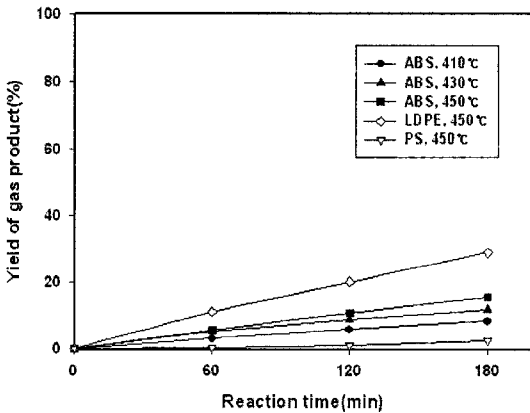
먼저 430°C에서 열분해한 LDPE의 경우 열분해시간을 1시간 이상 유지시키면 거의 대부분 열분해되며, 열분해 액상성생물의 수율은 반응시간이 증가할수록 감소하였다. 그러나 PS의 경우 LDPE나 ABS의 경우와는 달리 해중합이 일어나 단량체 등으로 분해되기 때문에 반응시간이 증가하여도 액상성생물의 수율변화는 미미한 수준이었다.

ABS의 경우 동일한 스티렌치환기를 가진 PS계 플라스틱과는 달리 각 열분해온도에서 반응시간을 1시간 유

지시하면 ABS는 대부분 열분해되며, 열분해 액상생성물의 수율은 반응시간이 증가할수록 감소하며 감소되는 정도는 반응온도가 증가할수록 더욱 두드러짐을 알 수 있다.

특히 450℃에서 3시간 열분해시킬 경우, LDPE의 경우 약 70 wt%의 액상생성물, PS의 경우 약 97 wt%의 액상생성물이 얻어지나 ABS의 경우 단지 약 55 wt%의 액상생성물이 얻어질 정도로 급감하였다. 그리고 ABS 열분해 액상생성물의 최대수율은 반응온도 410℃, 반응시간 1시간일 때 얻어졌다.

<그림 5>는 반응온도와 시간에 대한 ABS의 기상생성물 수율변화를 450℃에서 열분해한 LDPE, PS의 경우와 비교한 그림이다.



[그림 5] 열분해온도와 시간에 따른 LDPE, PS 그리고 ABS 플라스틱의 기상생성물의 수율변화

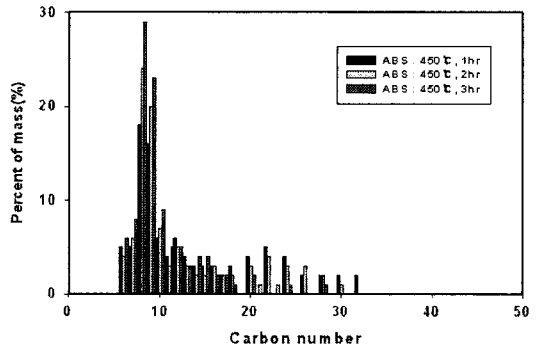
LDPE의 경우 반응초기부터 기상생성물이 생성되며 기상생성물의 생성수율은 열분해시간이 증가할수록 선형적으로 증가하였으나 PS의 경우 본 실험 온도조건 중에서 가장 격렬한 온도조건인 450℃에서 열분해시켜도 반응시간에 따른 기상생성물의 생성수율을 증가시키는 미미한 수준이었다.

ABS의 경우 기상생성물의 수율은 열분해온도와 시간이 증가할수록 선형적으로 증가하였다. 410℃에서 2시간 열분해시킬 경우 기상생성물은 약 5.5wt%이나 450℃에서 2시간 열분해시킬 경우 410℃의 경우보다 약 2배가량 증가한 약 11wt%의 기상생성물이 얻어졌다.

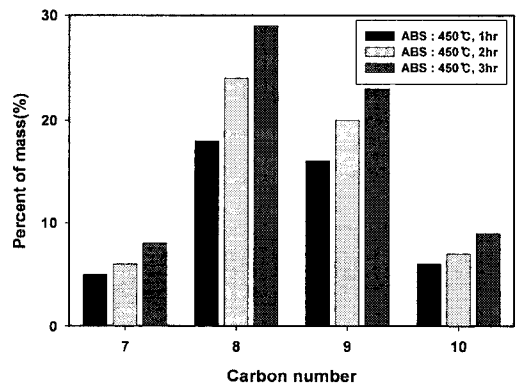
상기의 결과로부터 ABS 열분해반응은 LDPE 열분해 반응인 라디칼반응이 보다 더 우세하게 일어남을 알 수 있다.

열분해반응에서 주요 반응변수인 반응온도와 시간에 대한 액상생성물의 조성변화를 <그림 6-8>에 나타내었

다. 450℃의 열분해온도에서 반응시간을 1~3시간으로 변화시켰을 때 ABS 액상생성물의 탄소수에 따른 질량분포를 <그림6>에 나타내었다.



(a) 탄소수범위 0~50



(b) 탄소수범위 7~10

[그림 6] 열분해시간에 따른 ABS 플라스틱 액상 생성물의 탄소수분포 변화

동일한 열분해온도에서 반응시간이 증가할수록 탄소수가 적은 저분자 물질의 생성이 증가함을 알 수 있다. 450℃, 1시간 열분해조건인 경우 비교적 탄소수가 큰 25개 이상을 갖는 물질이 넓은 탄소수 범위에서 생성되나 열분해시간이 2~3시간으로 증가할수록 25개 이상의 탄소수를 갖는 물질의 생성은 감소하였다. 그리고 탄소수 10 주위를 확대한 그림에서 반응시간이 증가할수록 탄소수 7~9개를 가진 물질의 생성이 더욱 두드러지게 증가함을 보여주고 있다.

<그림 7>은 동일한 체류시간에서 ABS 액상생성물의 탄소수에 따른 질량분포 변화를 열분해온도에 따라 나타낸 그림이다.



- 화에 대한 결과를 미분반응기를 이용한 실험에서 얻을 수 있었으며 이로부터 실제적인 공정설계 및 공정조건 확립을 위해서는 미분반응기를 사용한 열분해특성실험이 필요함을 확인할 수 있었다.
2. ABS의 미분반응기를 이용한 열분해실험에서 반응온도와 시간이 증가할수록 고상잔류물과 기상생성물의 수율은 증가하였으나 액상생성물의 수율은 감소하였다.
  3. ABS의 열분해반응은 무작위절단반응과 해중합반응이 동시에 일어나며, 반응온도와 시간이 증가할수록 저분자 물질의 생성이 보다 더 증가함을 알 수 있었다.
  4. Arrhenius plot으로부터 얻은 ABS 열분해반응의 활성화에너지는 54.1kcal/mole이었다.

### 사용부호

- $k_s$  : 말단절단속도계수  
 $M_{nm}$  : 폴리머 용체의 수평균분자량  
 $m_{tot}$  : 폴리머 용체의 총무게, kg  
 $P_m$  : 폴리머 용체의 분자량모멘트  
 $W$  : 플라스틱시료 무게, kg  
 $T$  : 온도, °C

### 참고 문헌

- [1] 김동찬·우제경·노남선, “페플라스틱의 열분해/축매분해에 의한 생성오일의 품질평가”, 한국폐기물학회지, 제22권, 제18호, pp. 765-773, 2005.
- [2] 김기전·여정선·윤지영·김준호, “테레프탈레이트계 폴리에스터의 열분해 거동에 관한 연구”, 한국섬유공학회지, 제42권, 제14호, pp. 228-234, 2005.
- [3] 오세천·정명욱·김희택, “ZnO를 첨가한 PVC와 PS 혼합물의 열분해 특성에 관한 연구”, 공업화학, 제16권, 제14호, pp. 513-518, 2005.
- [4] M. Brebu, T. Bhaskar, K. Murai, A. Muto, Y. Sakata and M. A. Uddin, "The effect of PVC and/or PET on thermal degradation of polymer mixtures containing brominated ABS", Fuel, 83, pp. 2021-2028, 2004.
- [5] 이봉화·유홍정·김대수, “열분해에 의한 내충격 폴리스티렌 해중합 생성물의 분포 특성”, 고분자, 제29권, 제1호, pp. 64-68, 2005.
- [6] 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.
- [7] 김영민·김승도·박영권·김지만·전종기, “Si-MCM-41과 Si-MCM-48상에서의 HDPE의 촉매열분해”, 한국폐기물학회지, 제22권, 제6호, pp.556-562, 2005.
- [8] A. E. S. Green and S. M. Sadrameli, "Analytical representations of experimental polyethylene pyrolysis yields", J. Anal. Appl. Pyrolysis, 72, pp.329-335, 2004.
- [9] 정종모·양수경, “폴리이미드의 구조분석 : 가수분해 및 반응형 열분해법 응용”, 고분자과학과 기술, 제16권, 제1호, pp. 93-100, 2005.
- [10] Y. Kodera and B. J. McCoy, "Distribution kinetics of plastics decomposition", J. Jpn. Petro. Inst, 46, pp. 155-165, 2003.
- [11] M. Brebu, T. Bhaskar, K. Murai, A. Muto, Y. Sakata, and M. A. Uddin, "Removal of nitrogen, bromine, and chlorine from PP/PE/PS/PVC/ABr-Br pyrolysis liquid products using Fe-and Ca-based catalysts", Polymer Degradation and Stability, 87, pp.225-230, 2005.
- [12] 장은식·김승도·신대현·이경환, “미분열중량곡선의 극점 특성치를 이용한 HDPE 열분해동력학 변수결정에 관한 연구”, 화학공학, 제42권, 제3호, pp. 280-287, 2004.
- [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] 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.
- [15] 김상훈·장현태·차왕석, “회분식 미분반응기를 이용한 PE계 플라스틱의 열분해특성 연구”, 한국산화기술학회논문지, 제8권, 제3호, pp. 632-638, 2007.
- [16] 장준원·김진환·배진명, “Iron계 금속촉매가 ABS의 열분해 거동에 미치는 영향에 관한 연구”, 공업화학, 제16권, 제4호, pp. 496-501, 2005.
- [17] 김상훈·장현태·차왕석, “저온 열분해조건에서 PP 및 PS계 플라스틱의 열분해물 생성특성 연구”, 한국산화기술학회논문지, 제8권, 제4호, pp. 867-873, 2007.

**차 왕 석(Wang-Seog Cha)**

[정회원]



- 1981년 8월 : 고려대학교 화학공학  
학과(공학사)
- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공학  
학과(공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공학  
학과(공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학  
교 토목환경공학부 교수

<관심분야>

폐기물 가스화 및 열분해

**장 현 태(Hyun-Tae Jang)**

[정회원]



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

<관심분야>

흡착, 유동층반응