

TGA와 Py-GC/FID를 이용한 Al-MCM-48상에서 HDPE의 촉매 열분해†

金英民 · 金承道 · *朴榮權* · 金知晚** · 全鍾琪***

翰林大學校 環境시스템工學科, 서울시立大學校 環境工學部*
成均館大學校 化學科**, 公州大學校 化學工學部***

Catalytic decomposition of HDPE over Al-MCM-48 using TGA and Py-GC/FID†

Young-Min Kim, Seungdo Kim, *Young-Kwon Park*, Ji Man Kim** and Jong-Ki Jeon***

Dept. of Environmental System Engineering, Hallym Univ., Korea

**Faculty of Environmental Engineering, University of Seoul, Korea*

***Dept. of Chemistry, Sungkyunkwan University, Korea*

****Dept. of Chemical Engineering, Kongju University, Korea*

요 약

본 연구는 Al-MCM-48을 이용하여 HDPE를 촉매 분해하는 것으로, Al-MCM-48의 촉매 활성을 Al-MCM-41, Beta, ZSM-5와 비교하였다. Al-MCM-48를 사용한 열분해 활성은 무촉매 열분해의 활성보다 매우 높았다. 다른 촉매와 비교했을 때 Al-MCM-48의 활성화 에너지는 거의 차이가 없었다. 촉매의 점진적인 비활성화 경향도 조사하였다. ZSM-5와 Al-MCM-48은 Al-MCM-41과 Beta보다 비활성화 경향이 낮았다. Py-GC/FID(pyrolyzer)를 이용하여 열분해 생성물의 특성에 대하여 분석하였다. 그 결과 ZSM-5 촉매를 사용한 경우에는 C₁-C₄ 범위의 기상 생성물이 많이 생성되었다. Al-MCM-41과 Beta를 사용한 경우에는 주로 C₅-C₁₂ 범위의 화합물이 생성되었다. Al-MCM-48은 다른 촉매들에 비해 C₅-C₂₂ 범위의 오일 생성물에 대해서 높은 선택도를 나타내었다.

주제어 : HDPE, 열분해, 촉매, 비활성화, Al-MCM-48

Abstract

Al-MCM-48 was used as a catalyst to decompose high density polyethylene(HDPE). Catalytic activity of Al-MCM-48 was compared with those of Al-MCM-41, Beta, and ZSM-5. Catalytic decomposition rate over Al-MCM-48 was much higher than that of non-catalytic pyrolysis only. Compared to other catalysts, Al-MCM-48 revealed the little higher activation energy value. The progressive deactivation behavior of the catalysts has also studied. ZSM-5 and Al-MCM-48 showed slower deactivation rates than Al-MCM-41 and Beta. Pyrolysis coupled with gas chromatographic separation and flame ionization detection (Py-GC/FID) was also performed to assess the characteristics of pyrolysis products. ZSM-5 gave a higher fraction of gaseous products (C₁-C₄). Al-MCM-41 and Beta produced mainly C₅-C₁₂ products. The selectivity to oil product (C₅-C₂₂) obtained with Al-MCM-48 is higher than that with the other catalysts employed in this study.

Key words: HDPE, Pyrolysis, Catalyst, deactivation, Al-MCM-48

1. 서 론

플라스틱은 가볍고 가공이 용이할 뿐만 아니라 값이

저렴하기 때문에 많은 산업분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 현재 플라스틱의 국내 생산량의 증가와 더불어 폐플라스틱의 발생량도 꾸준히 증가하고 있다¹⁾. 이러한 폐플라스틱의 기존처리 방법으로는 매립, 소각, 재활용을 꼽을 수 있다. 그러나 폐플라스틱의 물리·화학적 안정성으로 인해 매립에 의한 처리는 점차 금지되고

† 2005년 11월 4일 접수, 2006년 9월 6일 수리

*E-mail: catalica@uos.ac.kr

있는 추세이며, 소각은 다이옥신 등의 대기오염물질 발생이 문제점으로 지적되고 있다. 재활용의 경우는 물질 재활용이 주로 이루어지고 있으나, 비교적 상품으로서의 가치가 떨어지는 재활용품의 질 때문에 수요창출의 어려움을 겪고 있다. 그러므로 폐플라스틱이 가지는 자원으로서의 가치를 최대한 활용할 수 있으면서도 환경 부하가 적은 처리방법의 개발이 시급한 실정이다.

열분해는 무산소 조건에서 유기물질이 외부에서 가해지는 열에 의해 환원·분해되는 공정으로 부가가치가 높은 기체, 액체, 고체부산물을 얻을 수 있으며 소각과 달리 2차오염물질의 발생량이 적기 때문에 플라스틱 처리의 대안으로 꼽히고 있다²⁾. 그러나 열분해는 흡열반응이므로 에너지 비용이 높고 생성물의 질이 균일하지 못하다는 단점을 가지고 있다³⁾. 그로 인해 반응온도를 낮추고, 원하는 생성물을 선택적으로 수득하기 위한 목적으로 플라스틱의 촉매열분해가 도입 적용되기 시작하였다³⁾.

특히, HDPE는 무촉매 열분해 시 높은 반응온도가 요구되고 생성물의 대부분을 차지하는 왁스성분의 경제적 가치가 떨어지게 때문에 이를 해결하기 위해 실리카-알루미나, HZSM-5, HY, 천연제올라이트, Clay, Beta, 활성탄 등 많은 촉매들이 HDPE의 열분해에 적용되어 왔다^{4,7)}. 그러나 기존의 촉매들은 반응산물인 코크가 촉매표면에 침착하여 촉매 비활성화가 빠르게 진행되거나 가스수율이 높아 고부가가치의 오일을 연속적으로 확보하는데 한계를 드러내고 있다^{8,9)}. 반면, Al-MCM-41과 같이 메조기공을 가지는 촉매들은 다량의 오일을 확보할 수 있는 측면에서 HDPE의 열분해에 적합하다고 보고되었다¹⁰⁻¹²⁾. 또한 삼차원의 기공 연결 구조를 갖는 Al-MCM-48은 1차원의 세공구조를 갖는 Al-MCM-41보다 HDPE 분해에 더 좋은 반응성을 보일 것으로 판단되나, 현재까지 이에 대한 연구는 부족한 상황이다.

본 연구의 목적은 메조포러스 산촉매인 Al-MCM-48의 HDPE 열분해 반응에 대한 촉매의 적용 가능성을 고찰하는 것이다. 열분해 반응속도, 촉매 비활성화 그리고 열분해반응 생성물의 특성에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Al-MCM-48의 촉매 성능을 단순 열분해의 경우뿐만 아니라 Al-MCM-41, Beta, ZSM-5를 반응 촉매로 적용한 경우와도 비교 평가하였다.

2. 실험

2.1 HDPE 시료 및 촉매

시료는 충격강도와 내약품성이 우수하여 식품용기

나 화장품용기의 원료물질로 주로 사용되는 HDPE (B230A, 삼성종합화학)를 사용하였다. HDPE시료와 촉매들은 입도의 균일성을 유지하고, 열전달에 의한 영향을 최소화하면서 TGA 운전 과정에서 분해 반응의 일관성과 안정성을 확보하기 위해 입도가 125~200 μm 인 시료만을 체거름을 통해 분리 선별하였다. 촉매는 Al-MCM-41, Al-MCM-48, Beta, ZSM-5를 사용하였다. Al-MCM-41과 Al-MCM-48은 이전 문헌에서 보고된 바와 같이 CTABr(Cethyltrimethylammonium bromide)를 주형물질로 하여 수열합성법(Hydrothermal synthesis method)에 의해 합성된 Si-MCM-41과 Si-MCM-48에 Al를 post-grafting method에 의해 담지하여 각각 제조하였고^{13,14)}, Beta와 ZSM-5는 Zeolyst사의 상용촉매를 사용하였다. 합성된 촉매의 물리적 특성은 Table 1에서 보는 것과 같다. 합성된 촉매는 550°C의 공기하에서 6시간 이상 소성한 후 질소가스 하에서 상온에서 500°C까지 10 °C/min의 승온률로 활성화시켰다. 사용된 촉매의 SiO₂/Al₂O₃는 25-30으로 일정하게 하였다.

Table 1. Physical properties of catalysts

	Al-MCM-41	Al-MCM-48	Beta	ZSM-5
BET surface area (m ² /g)	1032	1432	680	400
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	30	30	25	25

2.2 동역학 실험 및 분석방법

동역학 실험을 위해 열중량분석기(Thermogravimetric analyzer: TGA, Perkin Elmer, Pyris Diamond TG/DTA)를 이용하여 2, 3, 4 K/min의 승온속도로 상온에서 773 K까지 승온시켰다. 운반기체는 질소가스를 사용하였고, 부피유량은 80 ml/min을 유지하였다. 시료량은 약 4 mg이었고, 시료와 촉매의 중량혼합비는 3 : 1 (3 mg HDPE + 1 mg 촉매)이고 시료의 균일성을 유지하기 위해 HDPE와 촉매를 수작업으로 충분히 섞어 주었다. 동역학 분석은 Revised ozawa method¹⁵⁾를 사용하였고, 최종식은 식(1), (2)에서 보는 것과 같다. 동일한 전환율에 대하여 $\ln\beta$ 와 $1/T$ 의 관계를 도시하여 기울기로부터 각 전환율(X)에서의 활성화에너지값을 구할 수 있다.

$$n=1; \ln\beta = \ln\left(\frac{AE}{R}\right) + \ln\phi_a - 5.3305 + 1.0516\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

$$n \neq 1; \ln \beta = \ln \left(\frac{AE}{R} \right) + \ln \left(\frac{n}{\bar{\alpha}_a} - n + 1 \right) - 5.3305 + 1.0516 \left(\frac{E}{RT} \right) \quad (2)$$

여기에서

- A : 전지수인자(min⁻¹)
- n : 반응차수
- E : 활성화에너지(J/mol)
- R : 기체상수(8.314 J/mol·K)
- T : 온도(K)
- t : 시간(min)
- β : 승온속도(K/min)
- α_a : 극점에서의 평균 전환계수값(Average value of conversion factor at peak temperature)

또한 촉매의 재사용에 따른 비활성화정도를 알아보기 위해 열분해 반응에 통해 Coke의 침착이 일어난 촉매에 3 mg의 HDPE만을 더하는 방식으로 촉매 동역학 실험을 5회 이상 반복함으로써 촉매의 비활성화 정도를 평가하였다.

2.3 HDPE 열분해 부산물의 특성분석

열분해 부산물의 특성을 알아보기 위해 Py-GC/FID (Pyrolyzer: FRONTIER lab., PY-2020iD, GC: 영린기기 M600D)를 사용하였다. Pyrolyzer를 상온에서 600°C까지 승온시켰고, 반응 생성물은 Pyrolyzer와 On-line으로 연결된 GC로 전송하였다. 시료량은 약 0.4 mg를 사용하였고, HDPE와 촉매의 혼합비는 3:1이고, 시료의 균일성을 유지하기 위해 HDPE와 촉매는 충분히 섞어 주었다. 생성물의 분석은 ASTM D2887¹⁶⁾을 이용해 표준물질(SUPELCO, ASTM D2887, MISA)과의 컬럼내 체류시간을 비교함으로써 탄소수를 결정하였다. Pyro-GC/FID의 장치 모식도와 GC의 분석 조건은 Fig. 1에 명시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 HDPE의 촉매열분해 동역학

Fig. 2에서 보는 것처럼 Al-MCM-48의 HDPE 열분해 반응 시작온도는 Al-MCM-41보다 4K정도 낮은 값을 가지나 전환율이 대략 0.5 이상의 구간에서는 오히

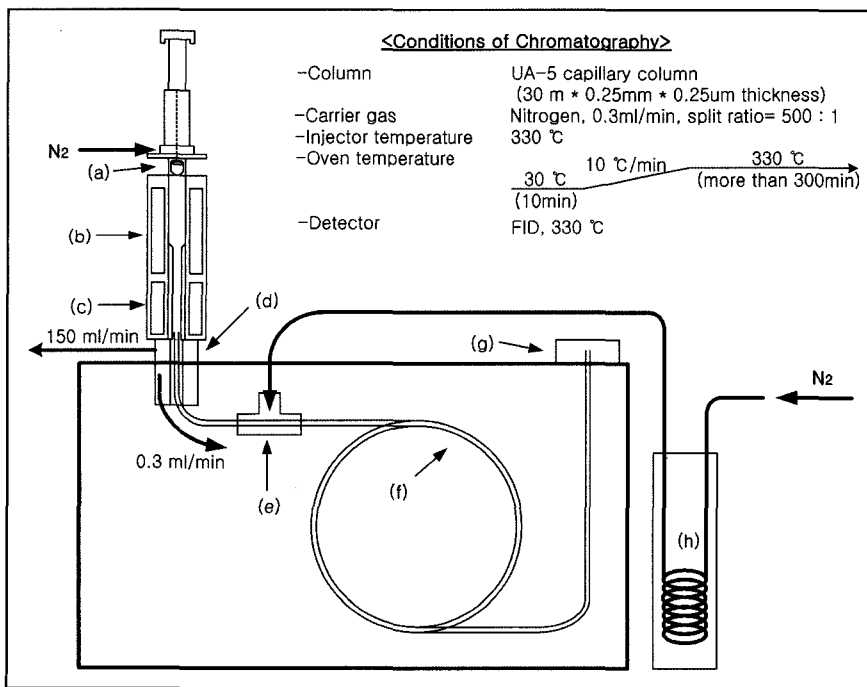


Fig. 1. Analytical flow diagram of Py-GC/FID. (a) Sample cup; (b) Pyrolysis furnace; (c) Interface heater; (d) GC Injector; (e) Microjet tube; (f) Column; (g) FID detector; (h) Liquid N₂.

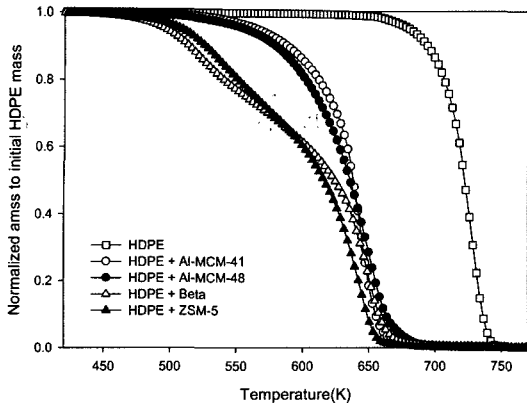


Fig. 2. TG Curves of pyrolysis only and catalytic decomposition of HDPE.

러 Al-MCM-41의 반응이 더 빠르게 진행되었다. Beta와 ZSM-5촉매는 초기반응구간($X < 0.5$)에서의 반응속도가 메조포어를 갖는 MCM촉매들에 비해 상당히 빠른 반응속도를 나타내나 극점온도(최대분해율에서의 온도)는 모든 촉매에서 거의 비슷한 값(644~652 K)을 갖는 것을 알 수 있다(Fig. 3).

Fig. 4는 HDPE 촉매열분해의 전환율에 대한 활성화 에너지값을 도시한 것이다. HDPE 순수 열분해 반응의 활성화에너지는 264~275 kJ/mol(평균값: $270 \pm$ kJ/mol)이었으며, 전환율에 따라 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 반면, 촉매를 사용할 경우에는 전환율에 따른 활성화 에너지의 변화폭이 큰 것으로 보인다. 촉매를 사용하여 열분해를 할 경우, 촉매와 물리적으로 혼합된 HDPE는 온도가 증가함에 따라 용융되기 시작하여 촉매입자사이로 이동한 후 촉매입자 표면에 존재하는 외부산점과 반

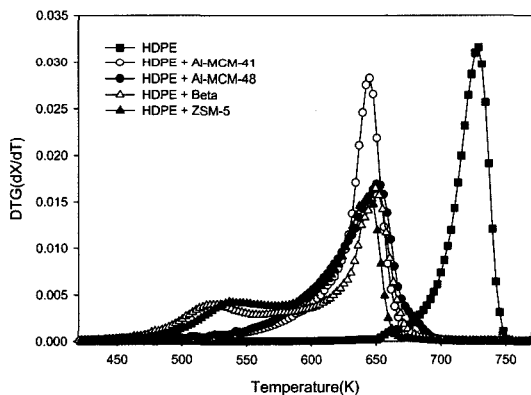


Fig. 3. DTG Curves of pyrolysis only and catalytic decomposition of HDPE.

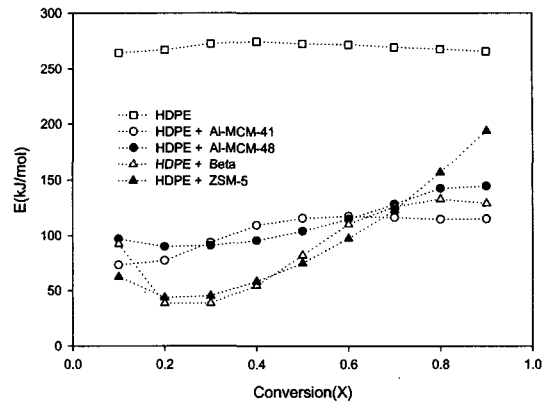


Fig. 4. Activation energy values of pyrolysis only and catalytic decomposition of HDPE.

응하여 작은 크기의 탄화수소로 전환되거나 촉매의 큰 기공내부로 유입되게 된다. 이때, 외부산점에 의해 형성된 탄화수소가 그 온도에서 휘발이 가능할 경우 폴리머 층을 통해 확산·휘발되어 TGA상에 질량감소로 나타나게 된다. 반면, 촉매의 기공내부로 유입된 탄화수소들은 기공내부의 산점과 반응하여 더 작은 분자체로 전환된 후 휘발된다¹⁷⁾. 이렇게 촉매반응은 여러단계의 반응경로를 거치므로 Fig. 4에서 전환율에 따른 활성화에너지의 변화폭이 순수 열분해 반응의 경우보다 큰 것으로 판단된다.

본 연구에 적용된 촉매 열분해와 순수 열분해의 활성화 에너지 평균값을 비교하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Zeolite Beta}(89 \text{ kJ/mol}) < \text{ZSM-5}(95 \text{ kJ/mol}) \\ & < \text{Al-MCM-41}(103 \text{ kJ/mol}) < \text{Al-MCM-48} \\ & (112 \text{ kJ/mol}) < \text{Pyrolysis only}(269 \text{ kJ/mol}) \end{aligned}$$

Al-MCM-48촉매의 경우 HDPE 열분해반응 활성화에너지 평균값은 약 112 kJ/mol로 순수 열분해보다 157 kJ/mol 이상 낮은 활성화에너지 값을 보였으나 Beta, ZSM-5, Al-MCM-41를 촉매로 사용한 경우에 비해서는 다소 높은 값을 가졌다. 그러나, Al-MCM-48과 다른 촉매들과의 활성화에너지 평균값의 차이는 9~23 kJ/mol로 측정오차범위에 속할 정도로 작은 것을 알 수 있었다.

3.2. 촉매 비활성화

Table 2는 HDPE열분해 반응 후 촉매에 침착된 Coke양을 나타낸 것이다. Al-MCM-41, Al-MCM-48, ZSM-5촉매의 경우에는 모두 약 1%이하의 Coke량을

Table 2. Comparison of coke levels deposited by thermo-gravimetric analysis

Catalyst	Coke(wt%)
Al-MCM-41	0.90
Al-MCM-48	0.79
Beta	2.49
ZSM-5	1.01

보였으나 Beta촉매의 경우에는 2%가 넘는 Coke가 형성된 것을 알 수 있다. Coke는 촉매의 기공입구를 차단하거나 기공내부의 산점에 침착되어 촉매 비활성화의 원인이 된다¹⁸⁾.

Fig. 5와 Table 3는 촉매 재사용에 따른 DTG와 최대분해온도를 각각 나타낸 것이다. Table 2의 Coke량의 결과에서 예상했듯이 Beta 촉매는 비활성화가 빠르게

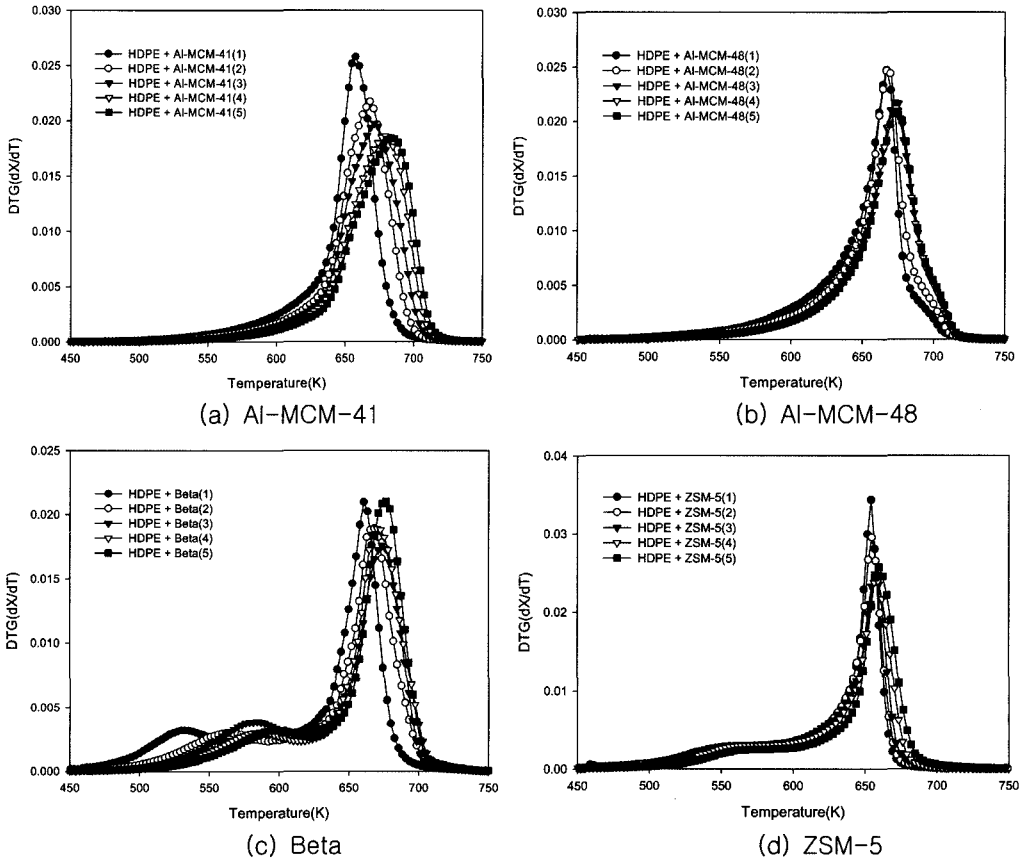


Fig. 5. DTG curves of catalytic decomposition of HDPE during consecutive experiments adding fresh polymer to the coked catalyst.

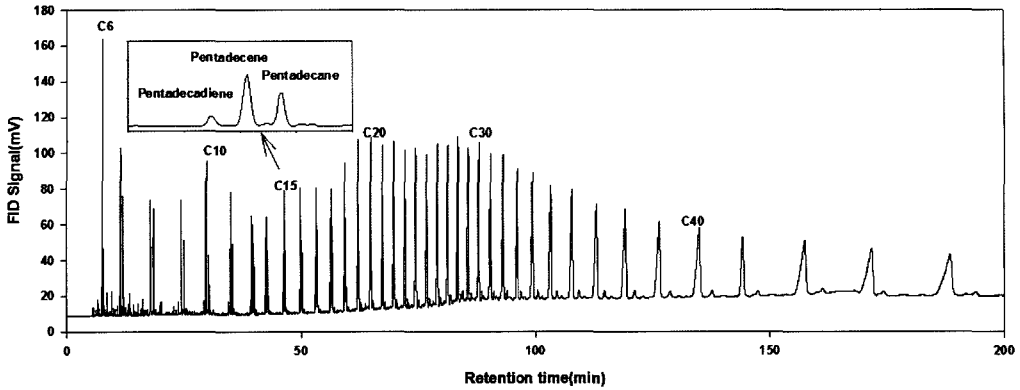
Table 3. Peak temperatures of catalytic decomposition of HDPE during consecutive experiments adding to the coked catalyst

Catalyst	No.	Peak Temp.(K)	Catalyst	No.	Peak Temp.(K)	Catalyst	No.	Peak Temp.(K)	Catalyst	No.	Peak Temp.(K)
Al-MCM-41	1	658	Al-MCM-48	1	667	Beta	1	661	ZSM-5	1	654
	2	668		2	667		2	668		2	655
	3	671		3	672		3	674		3	657
	4	679		4	673		4	670		4	659
	5	683		5	675		5	676		5	660

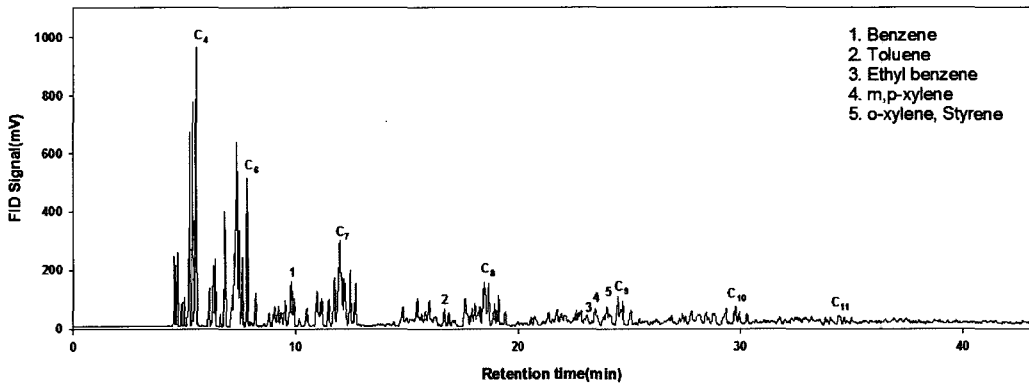
진행되는 반면 Al-MCM-48와 ZSM-5는 비활성화가 상당히 느린 속도로 진행되는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Al-MCM-48을 실제 열분해공정에 적용했을 때 촉매사용에 따른 비용을 절감할 수 있음을 시사하고 있다.

3.3. 열분해 반응 생성물 특성

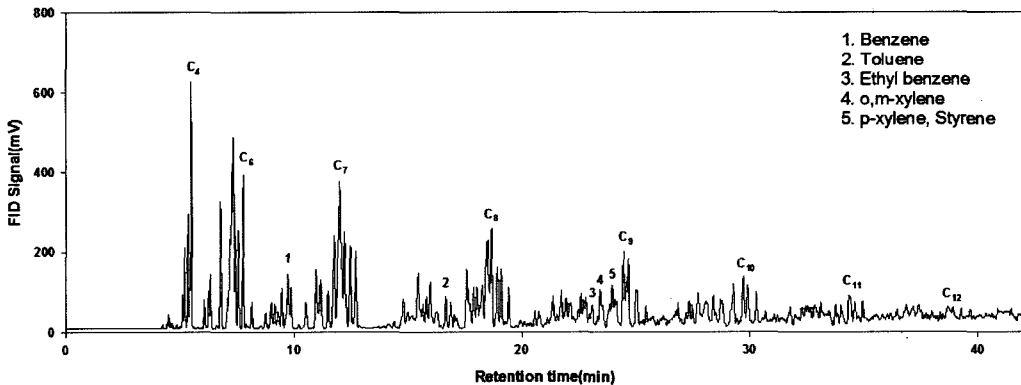
Fig. 6는 HDPE 순수열분해와 촉매열분해의 Py-GC 결과를 나타낸 것이다. HDPE 순수열분해(Fig. 6a)의 경우 탄소수별로 직선형 alkadiene, 직선형 alkene, 직선형 alkane의 전형적인 triplet피크가 나타나는 것을 알



(a) HDPE



(b) Al-MCM-41



(c) Al-MCM-48

Fig. 6. Py-GC/FID plots for pyrolysis only and catalytic decomposition of HDPE.

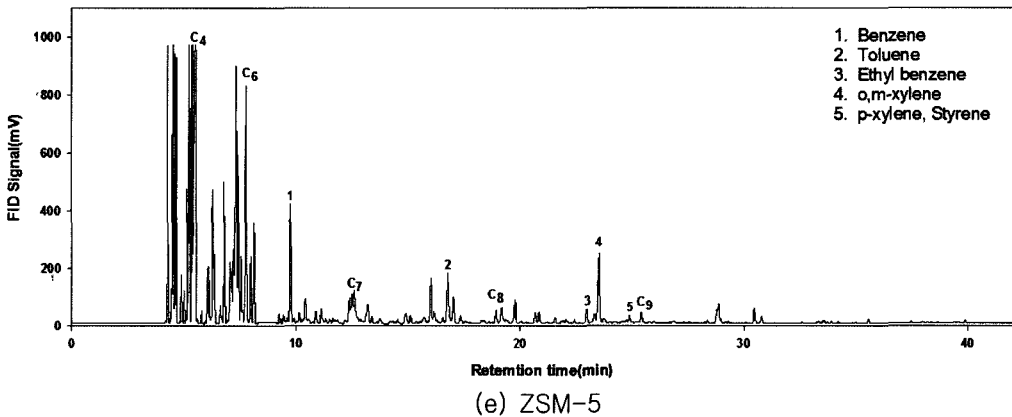
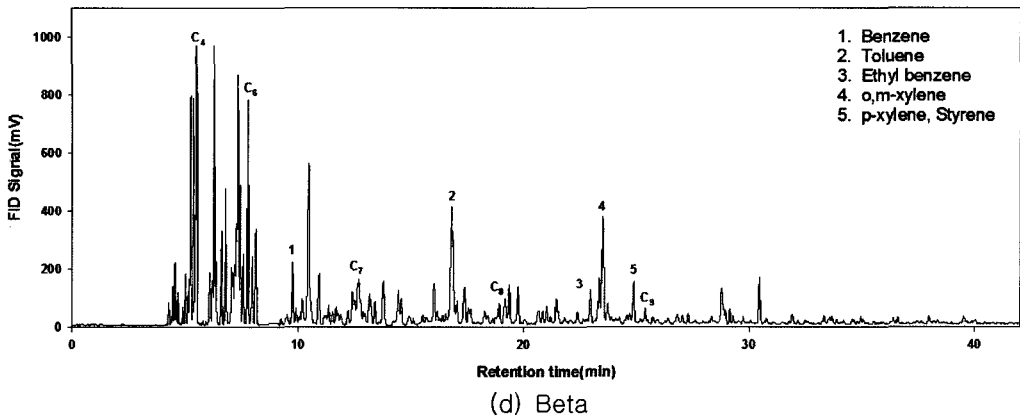


Fig. 6. Continued.

수 있다. 그러나 Benzene이나 Toluene와 같은 방향족화합물의 수율은 미미한 수준이었다.

Al-MCM-48(Fig. 6c)의 경우에는 단순열분해에 비해 직선형화합물(alkadiene, alkene, alkane)의 수율은 감소하고 방향족화합물의 수율이 증가했으며 알칸과 방향족 화합물 외에도 상당히 많은 피크가 관찰된 것으로 보아 isoalkane이나 isoalkene과 같은 화학종의 수율도 상당히 증가한 것으로 추정된다. 그러나 특정 성분으로의 선택도는 떨어지는 것으로 보였다. Al-MCM-41(Fig. 6b)의 경우는 Al-MCM-48과 거의 같은 양상의 생성물 분포를 보였다. 반면, Beta(Fig. 6d)나 ZSM-5(Fig.6e)의 경우에는 C4이하의 가스성분의 수율의 증가와 Toluene과 Xylene과 같은 방향족 화합물로의 높은 선택도를 보이는 특징을 나타냈다.

Fig. 7은 Pyro-GC로부터 얻은 생성물의 탄소수별 분포를 각각 나타낸 것이다. HDPE 단순열분해의 경우에는 높은 오일수율을 보였으나 연료로서의 가치가 떨어

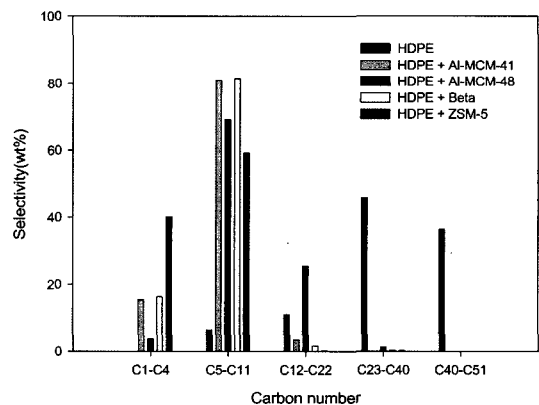


Fig. 7. Carbon number distributions of the products obtained by pyrolysis only and catalytic decomposition of HDPE.

지는 왁스성분(C₂₃~C₅₁)의 양이 82% 이상을 차지하였다. ZSM-5를 사용한 경우에 가스성분(C₁~C₄)의 양이

40%로 상당히 높은 편이었다. 반면 Beta나 Al-MCM-41을 사용한 경우에는 80% 이상이 가솔린 범위(C_5 - C_{11})에 해당했다. Al-MCM-48을 사용한 경우의 오일수율은 96% 이상으로 그의 대부분이 가솔린 범위(C_5 - C_{11})와 경유 범위(C_{12} - C_{22})로 나타났다. 이는 Al-MCM-48의 HDPE 열분해 촉매로서의 적용가능성이 높음을 시사하고 있다.

4. 결 론

Zeolite Beta, ZSM-5, Al-MCM-41, Al-MCM-48 촉매에 의한 HDPE열분해 반응활성화에너지의 평균값은 각각 89 kJ/mol, 95 kJ/mol, 103 kJ/mol, 112 kJ/mol이었다. 이처럼 Al-MCM-48은 다른 촉매들(Al-MCM-41, Beta, ZSM-5)보다 다소 높은 활성화 에너지를 가지나 그 차이가 오차범위 내에 속할 정도로 미미한 수준이고 HDPE 단순열분해의 경우보다는 현저하게 낮은 값을 가졌으므로 HDPE열분해 촉매로서의 가능성이 충분하다고 판단된다. 또한 coke의 생성량과 촉매의 재사용으로 인한 비활성화를 비교해 본 결과, Al-MCM-48과 ZSM-5촉매가 Al-MCM-41과 Beta촉매보다 유리한 것으로 나타났다.

Py-GC를 이용해 열분해 생성물을 분석한 결과, HDPE 단순열분해는 연료로서의 가치가 떨어지는 왁스 성분이 많이 형성되고 ZSM-5촉매의 경우에는 가스성분이 수율이 높았다. Beta나 Al-MCM-41을 사용한 경우에는 80%이상의 양이 가솔린 범위(C_5 - C_{11})에 해당했다. 특히, Al-MCM-48은 경질유 범위(C_5 - C_{22})에 해당하는 오일에 대한 선택도가 96%이상으로 가장 높았다

이러한 결과를 미루어 보아, Al-MCM-48촉매는 초기 활성은 다른 촉매들보다 다소 떨어지나 촉매의 재사용으로 인한 비활성화 측면에서 유리한 특성을 보였다. 특히, 생성물 중 경질유에 해당하는 오일성분의 수율이 가장 높은 것으로 미루어 보아 HDPE의 유류화 공정에 있어 적합한 촉매로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부 통계자료, 2001-2004: 전국 폐기물 발생 및 처리 현황.
2. 김승도, 2002: 저온열분해를 이용한 폐어망의 재활용 기술개발 산업, 해양수산부 보고서.
3. 박영권, 김주식, 최진희, 전종기, 김승도, 김승수, 김지란, 유경선, 2003: 플라스틱 촉매 열분해에 대한 고찰, 한국 폐기물학회지, **20**(6), pp.565-584.
4. Park, D.W., Hwang, E.Y., Kim, J.R., Choi, J.K., Kim, Y.A. and Woo, H.C., 1999: Catalytic degradation of polyethylene over solid acid catalyst, *Polymer Degradation and Stability*, **65**, pp.193-198.
5. Aguado, J., Serrano, D.P., Escola, J.M., Garagorri, E. and Fernandez, J.A., 2000: Catalytic conversion of polyethylenes into fuels over zeolite beta, *Polymer Degradation and Stability*, **69**, pp.11-16.
6. 장은석, 김승도, 김영민, Xingfan, 박영권, 옥근, 2003: 활성탄 접촉 조건에서의 n-Tetradecane의 열분해 반응특성에 대한 연구, 한국폐기물학회지, **20**(4), pp.404-414.
7. Gobin, K. and Manos, G., 2004 : Thermogravimetric study of polymer catalytic degradation over microporous materials, *Polymer Degradation and Stability*, **86**, pp.225-231.
8. Marcilla, A., Beltran, M.I., Hernandez, F. and Navarro, R., 2004: HZSM5 and HUSY deactivation during the catalytic pyrolysis of polyethylene, *Applied Catalysis A: General*, **278**, pp.37-43.
9. Lin, L.H., Yang, M.H., Yeh, T.F. and Ger. M.D., 2004: Catalytic degradation of high density polyethylene over mesoporous and microporous catalysts in a fluidised-bed reactor, *Polymer Degradation and Stability*, **86**, pp.121-128.
10. Aguado, J., Serrano, D.P., Romero, M.D. and Escola, J.M., 1996: Catalytic conversion of polyethylene into fuels over mesoporous MCM-41, *Chem. Commun.*, pp.725-726.
11. Aguado, J., Sotelo, J.L., Serrano, D.P., Calles, J.A. and Escola, J.M., 1997: Catalytic conversion of polyolefins into liquid fuels over MCM-41: Comparison with ZSM-5 and amorphous $SiO_2-Al_2O_3$, *Energy Fuels*, **11**, pp.1225.
12. Seddegi, Z. S., Budrthumal, U., Al-Arfaj, A. A., Al-Amer, A. M. and Barri, S. A. I., 2002: Catalytic cracking of polyethylene over all silica MCM-41 molecular sieve, *Applied Catalysis A: General*, **225**, pp.167-176.
13. Kim, J.M., Kwak, J.H., Jun, S. and Ryoo, R., 1995: Ion exchange and thermal stability of MCM-41, *J. Phys. Chem.*, **99**, pp.16742-16746.
14. Ryoo, R., Jun, S., Kim, J.M. and Kim, M.J., 1997: Generalized route to the preparation of mesoporous metallosilicate via post-synthetic metal implantation, *Chem. Commun.*, pp.2225-2226.
15. Kim, S. and Park, J.K. 1995: Characterization of thermal reaction by peak temperature and height of DTG curves, *Thermochimica Acta*, **264**, pp.137-156.
16. ASTM D 2887: Standard Test Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography

17. Lin, Y.H., Hwu, W.H., Ger, M.D., Yeh, T.F. and Dwyer J., 2001: A combined kinetic and mechanistic modelling of the catalytic degradation of polymers, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, **171**, pp.143-151.
18. Bartholomew C.H., 2001: Mechanisms of catalyst deactivation, Applied Catalysis A: General, **212**, pp.17-60.

金 英 民

• 2005 한림대학교 환경시스템공학과 졸업

金 承 道

• 1995 미국위스콘신대학 환경공학 박사
• 1997-현재 한림대학교 환경시스템공학과 교수

朴 榮 權

• 현재 서울시립대학교 환경공학부 조교수
• 본학회지 제13권 1호 참조

金 知 曉

• 1999 한국과학기술원 화학과 박사
• 2001-2005 아주대학교 응용화학부 조교수
• 2005-현재 성균관대학교 화학과 부교수

全 鍾 琪

• 현재 공주대학교 화학공학부 조교수
• 본학회지 제13권 1호 참조

〈광 고〉 본學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

- * EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원
(The 2th International Symposium on East Asian Recycling Technology)
- * 자원리사이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
- * 학회지 합본집 I, II, III, IV, V, VI 價格 : 40,000원, 50,000원(비회원)
(I: 통권 제1호~제10호, II: 통권 제11호~제20호, III: 통권 제21호~제30호, IV: 통권 제31~제40호, V: 통권 제41호~제50호, VI: 통권 제51호~제60호)
- * 한·일자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
- * 한·미자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
- * 자원리사이클링 총서I(1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
- * '97 미주 자원재활용기술실태조사(1997년) 107쪽, 價格 : 15,000원
- * 日本의 리사이클링 産業(1998년 1월)395쪽, 價格 : 22,000원, 발행처-文知社
- * EARTH 2001 Proceeding (2001) 788쪽, 價格 : 100,000원
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- * 오재현의 자동차 리사이클링기행(2003년 2월) 312쪽, 價格 : 20,000원, 발행처-MJ미디어
- * 리사이클링백서(자원재활용백서, 1999년) 440쪽, 價格 : 15,000원, 발행처-文知社
- * 리사이클링백서(자원재활용백서, 2004년), 578쪽, 價格 : 27,000원, 발행처-淸文閣