

# 폐플라스틱 열분해유의 납사 전환을 위한 수첨처리 및 수첨분해 촉매연구

김기덕 · 권은희<sup>†</sup> · 김광호 · 임석현 · Hai Hung Pham · 고강석 · 전상구 · 노남선

한국에너지기술연구원 기후변화연구본부  
(2022년 10월 26일 접수, 2023년 1월 26일 수정, 2023년 2월 4일 채택)

## Study of Hydrotreating and Hydrocracking Catalysts for Conversion of Waste Plastic Pyrolysis Oil to Naphtha

Ki-Duk Kim, Eun Hee Kwon<sup>†</sup>, Kwang Ho Kim, Suk Hyun Lim, Hai Hung Pham, Kang Seok Go, Sang Goo Jeon and Nam Sun Nho

Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea  
(Received October 26, 2022; Revised January 26, 2023; Accepted February 4, 2023)

### 초 록

플라스틱의 폐기물 및 화학원료로의 재활용 분야에 대한 사회적 관심이 급격히 높아지고 있는 상황에서, 폐플라스틱 열분해유를 이용한 납사 생산은 가장 기술 장벽을 낮춰 시대적 요구에 가장 빠르게 대응할 수 있는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 폐플라스틱 열분해유를 이용한 수첨처리, 수첨분해에 대한 연구를 진행하였다. 자세하게는 수첨처리를 통한 불순물 제거, 수첨분해를 통한 납사 수율 증대를 목적으로 연구를 진행하였다. 그 결과 폐플라스틱 열분해유 중 200 °C 이하의 비점을 가지는 납사유분은 황화물계 촉매를 이용한 370 °C, 2시간 조건에서의 수첨처리를 통해 90 wt% 이상의 황 및 질소 전환율, 염소의 경우 거의 100 wt%에 가까운 전환율을 확인하였고, 200 °C 이상 비점을 가지는 폐플라스틱 열분해 중질유분은 NiMo/ZSM-5 촉매를 이용한 400 °C, 2시간의 수첨분해를 통해 35.7 wt%의 납사 수율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

In response to environmental demands, pyrolysis is one of the practical methods for obtaining reusable oils from waste plastics. However, the waste plastic pyrolysis oils (WPPO) are consumed as low-grade fuel oil due to their impurities. Thus, this study focused on the upgrading method to obtain naphtha catalytic cracking feedstocks from WPPO by the hydro-processing, including hydrotreating and hydrocracking reaction. Especially, various transition metal sulfides supported catalysts were investigated as hydrotreating and hydrocracking catalysts. The catalytic performance was evaluated with a 250 ml-batch reactor at 370-400 °C and 6.0 MPa H<sub>2</sub>. Sulfur-, nitrogen-, and chlorine-compounds in WPPO were well eliminated with nickel-molybdenum/alumina catalysts. The NiMo/ZSM-5 catalyst has the highest naphtha yield.

**Keywords:** Waste plastic pyrolysis oil, Transition metal sulfide catalysts, Hydroprocessing

## 1. 서 론

최근 국내외의 플라스틱 소비량의 증가는, 플라스틱 폐기물의 증가를 야기했다. 특히 COVID-19 등에 의해 높은 배달 및 포장 수요는 관련 일회용 플라스틱의 생산량을 증가시켰다. 2020년 기준 배달 및 포장용기 생산은 전년 9.2만톤에서 11.9만톤으로 급격하게 증가하였고[1], 이로 인해 발생하는 폐플라스틱의 재활용 분야에 대한 사회적 관심이 급격히 높아지고 있다. 특히, 온실가스를 유발하는 연료로의 활용보다는 화학적 원료화를 통한 자원 재순환의 개념을 적용하여 석

유·화학 원료로 전환하는 기술의 수요가 산업계를 중심으로 요구되고 있다[2]. 이러한 상황에서, 긴 선형의 고분자 구조를 특징으로 가지는 플라스틱은 C-C 결합의 분해만으로 선형의 탄화수소 유분을 얻을 수 있어, 다시 플라스틱의 원료인 납사로 전환할 수 있는 가능성이 높다. 그렇기 때문에, 폐플라스틱의 납사로의 전환 기술의 연구를 통해 시대적 요구를 충족시킬 수 있다[3].

폐플라스틱을 대상으로 하는 화학적처리 방법은 가수분해(Hydrolysis), 글리콜화(Glycolysis), 메탄올화(Methanolysis), 아미노화(Aminolysis), 에스테르화(Transesterification) 등과 같은 해중합(Depolymerization) 방법, 정제(Refinery), 수소화(Hydrogenation), 전자기적 가스화(Electrokinetic Gasification), 용융금속 분리(Molten Metal Bath), 열분해(Advanced Pyrolysis), 고분자 용해(Polymer Dissolution), 초임계유체 반응 등과 같은 기술을 통하여 폐플라스틱을 플라스틱의 원재료인 단량체로 회수하거나 화학연료로 전환하는 방법 등이 있다[2,4]. 이러한 현재 폐

<sup>†</sup> Corresponding Author: Korea Institute of Energy Research  
Climate Change Research Division, Daejeon 34129, Republic of Korea  
Tel: +82-42-860-3698 e-mail: eun-h90@kier.re.kr

플라스틱의 재활용 방법 중, 킬른 반응기를 이용한 열분해가 가장 잘 상용화되어 있다[2,5]. 그러나 이러한 열분해 공정은 일반적으로 저급 연료유의 생산을 주 목적으로 하기 때문에, 황, 질소, 염소, 산소 등을 함유하고 있는 다양한 불순물을 포함한 상태로 공급되는 경우가 많다.

유분 내 존재하는 불순물은 납사를 이용한 공정에서 촉매의 비활성화를 유발하기 때문에[6], 열분해유를 납사로 전환하여 이용하기 위해서는 먼저 해당 불순물의 제거가 이루어져야 한다. 수소를 첨가하여 황 및 질소 등의 성분을 제거하는 수침처리 공정은 정유공정에서 가장 일반적으로 사용되는 불순물 제거 방법이다[7]. 또한, 염소 역시 수침탈염소 반응을 통해 제거될 수 있다. Jixiang Chen 및 몇몇 연구자들에 의해 chlorobenzene에 대한 모델 반응 연구가 진행되었고[8,9], 귀금속 촉매에 대한 수침탈염소 반응에 대한 연구가 몇가지가 발표되었다[10-12]. 그러나 상용화된 촉매나 공정은 아직 존재하지 않아 추가적인 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 수침탈염소 반응을 포함한 수침처리 반응에 대해 연구를 진행하였다.

또한, 400~500 °C에서 진행되는 페플라스틱 열분해는 액상 연료유를 목적으로 하기 때문에, 다양한 비점의 열분해유가 혼합되어 있다. 연료유가 아닌 석유화학 원료로 이용하기 위해서는, 추가적인 분해를 통해 고비점의 열분해유분을 저비점의 납사유분으로 전환시킬 필요가 있다. 이 때, 수침분해는 열분해에 수반되는 olefin의 생성을 억제하기 때문에, 납사유분 수율 증대에 적합한 반응 중 하나이다[13,14]. 이러한 이유 때문에, 열분해를 거치지 않고 수침분해를 시도하는 경우도 있었다[15]. 그러나 페플라스틱의 수침분해를 바로 진행하기에는, 고체상의 반응물을 고온 고압의 수소 조건에서 처리해야 하는 문제와 균일하지 않은 폐기물의 특성 때문에 기술적 난이도가 높다.

따라서 본 연구에서는 기존 열분해를 통해 얻어진 페플라스틱 열분해유를 이용한 납사 유분으로의 전환을 목적으로 하여, 상용화에 문제가 되는 기술장벽을 낮추기 위한 연구를 진행하였다. 상세하게는 기존 열분해를 통해 얻어진 페플라스틱 열분해유를 수침처리를 통해 불순물을 제거하고, 수침분해를 통해 납사 비점 범위의 유분을 얻어, 석유화학 원료로 사용 가능한 납사를 얻는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험

페플라스틱 열분해유는 국내의 페플라스틱 열분해 업체에서 공급 받았다. 페플라스틱 열분해유의 비점 분포는 GC-SIMDIS 장비를 이용하여 분석하였고, total nitrogen sulfur analyzer (Mitsubishi, NSX-2100V)를 이용하여 황 및 질소 함량, X-ray fluorescence instrument (Oxford instruments, X-Supreme 8000)를 이용하여 염소 함량을

측정하였다. 그리고 GC-SCD (Sulfur Chemiluminescence Detector) 및 GC-NPD (Nitrogen Phosphorous Detector)를 통해 황, 질소가 포함된 물질을 선택적으로 분석하였다. 자세한 열분해유의 성상은 Table 1에 정리하였다.

수침처리 및 수침분해용 촉매는 수용성 전구체인 nickel(II) nitrate hexahydrate (95% Sigma-Aldrich), ammonium paramolybdate tetrahydrate (99%, Alfa Aesar) 시약을 이용하여 습식 함침법(Wet impregnation)을 이용하여 준비하였다. 1.157 g의 ammonium paramolybdate tetrahydrate와 0.526 g의 nickel(II) nitrate hexahydrate을 증류수에 용해시켜, 10.0 g의 지지체에 섞어 오븐에서 120 °C에서 4시간 건조시켰다. 건조된 혼합물을 550 °C에서 4시간 동안 소성하여 산화물 상태의 촉매를 합성하였다.

수침처리 및 수침분해 촉매의 반응 평가는 250 ml 회분식 반응기를 이용하여 진행하였다. 페플라스틱 열분해유는 200 °C로 증류하여 저비점의 수침처리용 열분해 납사유분과 수침분해가 필요한 열분해 중질유분을 각각 준비하였다. 각 반응물은 황화물계 촉매 형성을 위한 dimethyl disulfide (Sigma-Aldrich, 99.0%)를 5 wt% 비율로 혼합하였다. 35.0 g의 혼합된 반응물을 반응기에 촉매와 함께 넣고 수소 기체를 주입하여 25 °C에서 6.0 MPa의 수소분위기로 회분식 반응기를 준비하였다. 교반기를 1500 rpm으로 유지하면서 온도를 400 °C까지 10 °C/min으로 승온하여 2시간을 유지하였고, 이후 반응 온도를 조절한 후 2시간을 추가로 유지하였다. 반응이 끝난 후, 반응기를 상온으로 냉각시키고 생성물을 회수하여, 페플라스틱 열분해유와 마찬가지로 황 및 질소, 염소 함량을 측정하였다. 또한, 수침분해 생성물은 GC-SIMDIS 장비를 이용하여 분석을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 페플라스틱 열분해유 특성 분석

Table 1은 페플라스틱 열분해유의 불순물과 비점 분포를 정리한 표이다. 페플라스틱 열분해유 내의 불순물의 양은 nitrogen > chlorine > sulfur 순으로 많았고, 이 경향은 200 °C 이하의 열분해 납사분(Naphtha fraction)과 200 °C 이상의 중질유분(Heavy fraction) 모두 동일했다. 황 및 질소 불순물은 200 °C 이상의 비점을 가지는 열분해 중질유분에 페플라스틱 열분해유보다 높은 농도로 존재하며, 이는 페플라스틱 열분해유 내에는 고비점의 불순물이 상대적으로 많이 존재함을 의미한다. 반대로, 염소 불순물은 열분해 납사분이 페플라스틱 열분해유보다 높은 농도를 가지고, 이는 저비점의 염소계열 불순물이 상대적으로 많이 존재함을 의미한다.

Table 1. Heteroatoms and Boiling Point Distributions of Waste Plastic Pyrolysis Oil

		Sample		
		WPPO	Naphtha fraction	Heavy fraction
Heteroatoms [wppm]	Sulfur	108	44	119
	Nitrogen	1549	1209	1659
	Chlorine	410	610	392
Distillation [wt%]	Light naphtha (30~90 °C)	5.5	8.5	-
	Heavy naphtha (90~180 °C)	30.5	85.5	18.5
	Middle distillates (180~343 °C)	39.5	6.5	55.5
	Vacuum gas oil (343~524 °C)	22.0	-	21.0
	Vacuum residue (> 524 °C)	2.5	-	5.5

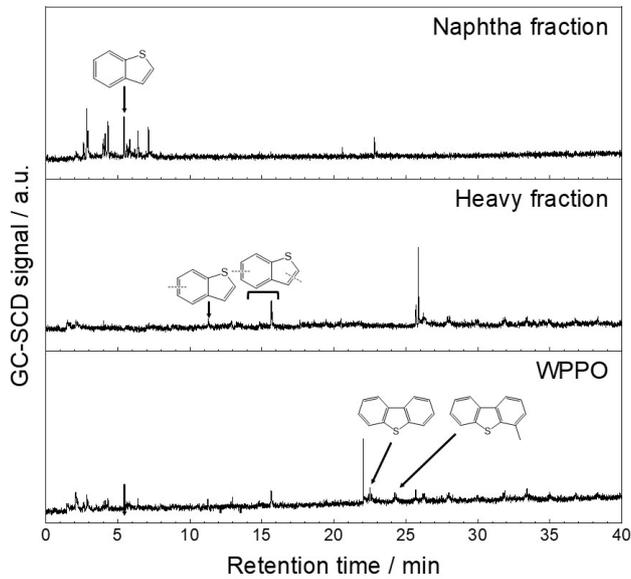


Figure 1. GC-SCD chromatographs of waste plastic pyrolysis oil, naphtha fraction and heavy fraction.

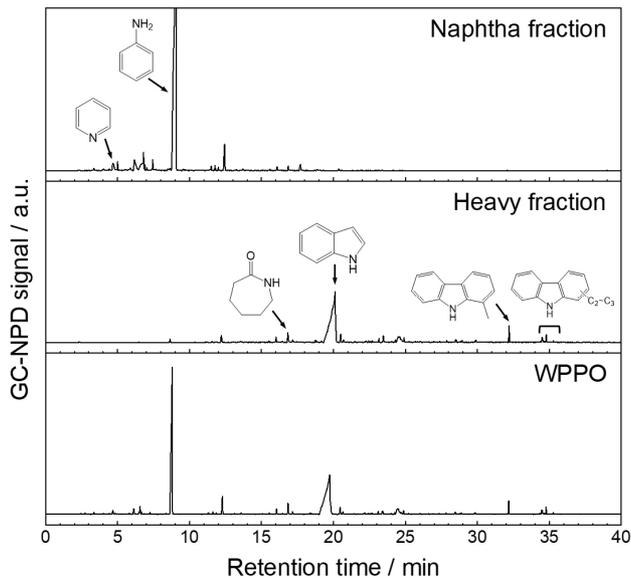


Figure 2. GC-NPD chromatographs of waste plastic pyrolysis oil, naphtha fraction and heavy fraction.

Figure 1에서 GC-SCD를 통해 폐플라스틱 열분해유, 열분해 납사분 및 중질유분 내의 황화합물 분석을 분석하였다. 이를 통해, 폐플라스틱 열분해 납사분에는 benzothiophene 계열의 불순물이 주성분이고, 폐플라스틱 열분해 중질유분에는 dibenzothiophene이 주성분임을 확인할 수 있었다. 이는 기존 정유공정의 수첨처리에서 처리할 수 있는 전형적인 난분해성 화합물들 (Refractory compounds)로서, 300~400 °C 온도 범위에서 제거 가능하다[16,17].

마찬가지로 Figure 2에서 GC-NPD를 통해, 폐플라스틱 열분해유, 열분해 납사분 및 중질유분 내의 질소화합물 분석을 분석하였다. 폐플라스틱 열분해 납사분에는 aniline이, 폐플라스틱 열분해 중질유분에는 indole이 주성분임을 확인할 수 있었다. 수첨탈황 촉매의 피독의

Table 2. Major Sulfur- and Nitrogen-Compounds of Waste Plastic Pyrolysis Oil

Heteroatoms	Sample			
	WPPO	Naphtha fraction	Heavy fraction	
Sulfur-compounds	Benzothiophene	3	4	-
	benzothiophene derivatives	8	18	9
	4-methyl-dibenzothiophene	11	-	16
Nitrogen-compounds	Pyridine	15	26	-
	Aniline	506	957	-
	Indole	528	-	1062

Table 3. Characterization of Commercial Hydrotreating Catalysts

Sample name	Type	Metal contents (wt%)		BET		
		Co (or Ni)	Mo	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Total pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	Mean pore diameter (nm)
HDT1	CoMo/Alumina	4.0	8.1	252.3	0.61	9.68
HDT2	CoMo/Alumina	2.9	10.3	282.8	0.38	5.37
HDT3	NiMo/Alumina	4.5	9.9	253.4	0.65	10.32

원인이 되는 염기성 질소화합물과 다르게, aniline 및 indole과 같은 비염기성 질소화합물은 수첨탈황 반응을 통해 제거가 가능하다[18,19]. 이를 통해, 기존 석유계 질소 화합물보다 제거가 용이한 불순물이 주성분임을 알 수 있었다.

### 3.2. 폐플라스틱 열분해유 수첨처리

Table 3은 국내 촉매사에서 제조된 상용 수첨처리 촉매의 종류 및 물성을 정리한 표이다. 모두 수첨처리용 촉매로 5 wt% 이하의 Ni 또는 Co 금속과 8~11 wt%의 Mo 금속이 모두 Alumina에 담지된 CoMo, NiMo 촉매이다. HDT1 촉매와 비교하여, HDT2 촉매는 상대적으로 Co 금속이 적게 담지되어 있고, Mo 금속은 많이 담지되어 있다. 또한, HDT2 촉매의 비표면적이 HDT1에 비해 상대적으로 높지만, 평균 pore 직경은 작다. 이에 비해, HDT3 촉매는 HDT1과 비슷한 비표면적을 가지지만, Co 대신 Ni이 담지되어 있다.

Table 3의 상용 수첨처리 촉매를 적용하여, 폐플라스틱 열분해 납사유분을 370 °C, 2시간 반응평가 후 황 및 질소, 염소의 전환율을 Figure 3에 나타내었다. 모든 촉매에 대하여, 열분해 납사유분 범위의 황 및 질소는 93 wt% 내외의 높은 전환율을 얻었다. 특히 염소의 경우, 모두 95 wt% 이상의 높은 전환율을 나타냈으며, CoMo 계열 촉매보다는 NiMo 계열 촉매인 HDT3 촉매에서 더 높은 전환율을 확인했다. 질소 전환율 역시, NiMo 계열 촉매에서 상대적으로 높았다. CoMo계열 촉매들 중에서도 HDT1 촉매보다 상대적으로 Mo 함량이 많은 HDT2 촉매가 높은 질소 및 염소 전환율을 가지고, 황 전환율은 넓은 기공 구조를 갖는 HDT1에서 더 높게 확인되었다.

상용 수첨처리 촉매를 적용하여, 폐플라스틱 열분해 중질유분을 370 °C, 2시간 반응평가 후 황 및 질소, 염소의 전환율을 Figure 4에 나타내었다. 폐플라스틱 납사유분에 비해, 중질유분의 황 및 질소 전환율은 전반적으로 낮았다. 이와 반대로, 염소 전환율은 황 및 질소

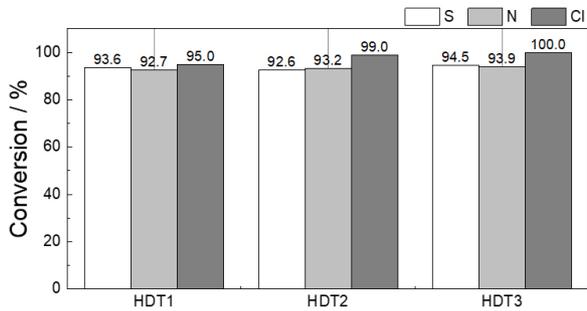


Figure 3. Conversions of heteroatoms in naphtha fraction of waste plastic pyrolysis oil.

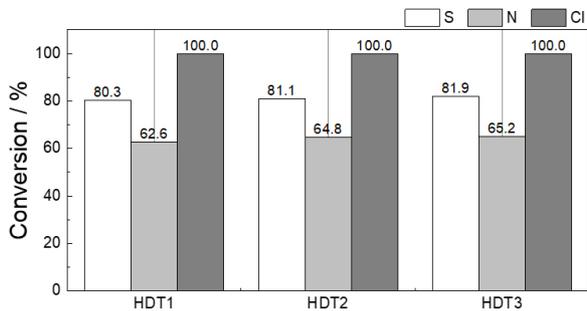


Figure 4. Conversions of heteroatoms in heavy fraction of waste plastic pyrolysis oil.

전환율보다 훨씬 높은 100 wt%의 전환율을 보였고, 이를 통해 수첨탈황 및 수첨탈질소 반응과 수첨탈염소 반응이 경쟁 반응을 확인할 수 있었다. 특히, 페플라스틱을 열분해한 후 생성되는 주요 염소 화합물이 benzochlorine 계열의 불순물이므로[20], 촉매의 활성점이 난분해성 화합물 보다 더 제거하기 용이한 염소화합물을 더 잘 전환시킨 결과로 보인다. 페플라스틱 열분해 중질유분의 황 및 질소 전환율도, 열분해 납사유분과 유사하게 NiMo계열 촉매인 HDT3에서 높은 전환율을 보였다. 이를 통해, 황, 질소, 염소 불순물의 복합적인 제거에는 NiMo계열 촉매가 CoMo 계열 촉매보다 더 효과적임을 알 수 있었다.

### 3.3. 페플라스틱 열분해유 수첨분해

수첨분해 촉매를 합성하기 위해, 제올라이트 지지체로 NiMo 촉매를 합성하여 활성을 비교하였다. 지지체는 Zeolyst사의 8종의 Mordenite, Y-zeolite, ZSM-5 및 Beta-zeolite를 사용하였다.

반응 온도에 따른 수첨분해 생성물 및 기상 생성물을 비교하기 위해서, 페플라스틱 열분해 중질유분을 400~435 °C 범위에서 반응 평가를 진행하여 Figure 5에 나타내었다. 400, 420, 435 °C로 반응 온도 증가시킴에 따라 경질납사(Light naphtha) 및 중질납사(Heavy naphtha), 그리고 기상 생성물이 증가하였다. 반대로 반응 온도 증가에 따라 감

Table 4. Physical Properties of Hydrocracking Catalysts

Catalyst name	Zeolite name	SAR	Surface area [m <sup>2</sup> /g]
NiMo/Mordenite	CBV 10A	13	425
NiMo/Y-zeolite	CBV 720	30	720
NiMo/ZSM-5	CBV 8014	80	425
NiMo/Beta	CP 814E	25	680

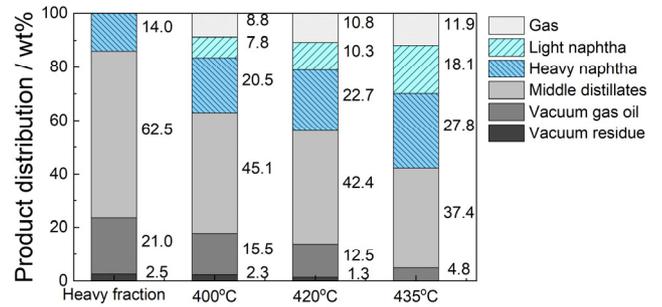


Figure 5. Reaction temperature effect on hydrocracking product distributions.

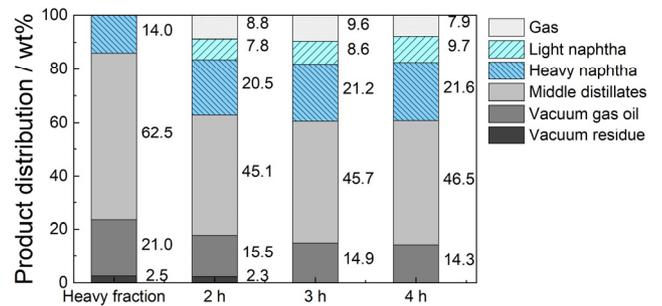


Figure 6. Reaction time effect on hydrocracking product distributions.

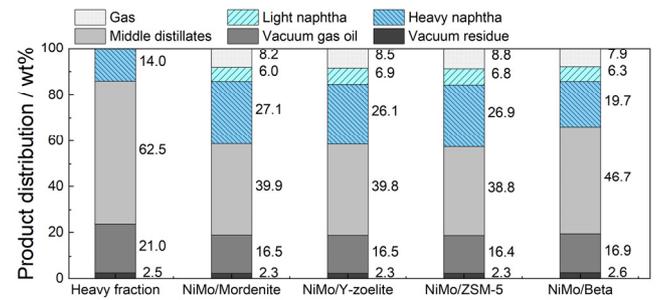


Figure 7. Support type effect on hydrocracking product distributions.

압산사유 및 감압가스유의 비율은 감소하였다. 위 결과를 통해 400 °C 이상에서 페플라스틱 열분해 중질유분에서 수첨분해가 진행됨을 확인하였고, 온도 증가에 따라 더 경질화시킬 수 있지만 기상 생성물이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

Figure 6에서 NiMo/ZSM-5 (80) 촉매를 이용하여 400 °C의 반응 조건에서 반응 시간을 증가시켜, 생성물 분포를 비교하였다. 반응 시간 2시간 결과와 3시간 결과는 경질 납사 7.8 wt%에서 8.6 wt%, 중질 납사 20.5 wt%에서 21.2 wt%로 유의미한 차이를 보이지만, 4시간 반응 평가부터는 큰 개선효과를 보이지 않았다. 이는, 유사한 반응조건에서는 반응 시간을 통해 분해 효율을 늘리는 것에는 한계가 있음을 나타낸다. 따라서 Figure 5, 6을 통해, 높은 납사 수율을 얻기 위해서는 긴 반응 시간보다 고온의 반응 조건이 유리하지만, 기상생성물 또한 증가함을 확인하였다.

다양한 제올라이트를 이용하여 합성한 NiMo 촉매를 이용, 400 °C, 2시간의 반응 시간 조건에서 수첨분해를 진행하여 결과를 Figure 7에 나타냈다. 중질 납사는 Mordenite (27.1 wt%) > ZSM-5 (26.9 wt%) > Y-zeolite (26.1 wt%) > Beta (19.7 wt%) 순으로 높은 수율을 보였고, 경질 납사는 Y-zeolite (6.9 wt%) > ZSM-5 (6.8 wt%) > Beta (6.3

wt%) > Mordenite (6.0 wt%) 순으로 높은 수율을 보였다. ZSM-5가 가장 높은 가스 생성물이 생겼지만, 가장 적은 감압가스유 및 중간유분 (Middle distillates)의 생성물 분포를 가지고 있어, 페플라스틱 열분해 중질유분의 수첨분해에 적합한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

페플라스틱 열분해유 중 200 °C 이하의 비점의 납사유분은 NiMo, CoMo 황화물계 촉매를 이용한 370 °C, 2시간의 수첨처리를 통해 90 wt% 이상의 높은 황 및 질소 전환율을 가지고, 염소의 경우 거의 100 wt%에 가까운 전환율을 보인다. 또한, 200 °C 이상 비점의 페플라스틱 열분해 중질유분은 NiMo/ZSM-5 촉매를 이용한 수첨분해를 통해 35.7 wt%의 납사 수율을 얻을 수 있었다. 따라서, 페플라스틱 열분해유는 수첨처리 및 수첨분해를 통해서 석유화학 원료인 납사 유분으로 고품위화할 수 있음을 확인하였다.

#### 감 사

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제명 : 1 ton/day 규모 페플라스틱 열분해유의 촉매화학적 업그레이딩을 통한 나프타 원료 생산 기술 개발, 과제 번호 : 20015430)

#### References

1. Korea Environment Corporation, National waste generation and treatment status (2021).
2. K. Ragaert, L. Delva, and K. Van Geem, Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste, *Waste Manag.*, **69**, 24-58 (2017).
3. S. M. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review, *Waste Manag.*, **29**, 2625-2643 (2009).
4. T. Thiounn and R. C. Smith, Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste, *J. Polym. Sci.*, **58**, 1347-1364 (2020).
5. M. Solis and S. Silveira, Technologies for chemical recycling of household plastics - A technical review and TRL assessment, *Waste Manag.*, **105**, 128-138 (2020).
6. E. Rodríguez, G. Félix, J. Ancheyta, and F. Trejo, Modeling of hydrotreating catalyst deactivation for heavy oil hydrocarbons, *Fuel*, **225**, 118-133 (2018).
7. G.-N. Yun, K.-D. Kim, and Y.-K. Lee, Hydrotreating of waste tire pyrolysis oil over highly dispersed Ni<sub>2</sub>P catalyst supported on SBA-15, *Catalysts*, **11**, 1272 (2021).
8. X. Liu, J. Chen, and J. Zhang, Hydrodechlorination of chlorobenzene over silica-supported nickel phosphide catalysts, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**, 5362-5368 (2008).
9. J. Chen, L. Sun, R. Wang, and J. Zhang, Hydrodechlorination of chlorobenzene over Ni<sub>2</sub>P/SiO<sub>2</sub> catalysts: Influence of Ni<sub>2</sub>P loading, *Catal. Lett.*, **133**, 346-353 (2009).
10. C. Amorim, G. Yuan, P. Patterson, and M. Keane, Catalytic hydrodechlorination over Pd supported on amorphous and structured car-

11. L. Ma, Gómez-Sainero, X. L. Seoane, J. L. G. Fierro, and A. Arcoya, Liquid-phase hydrodechlorination of CCl<sub>4</sub> to CHCl<sub>3</sub> on Pd/Carbon catalysts: Nature and role of Pd active species, *J. Catal.*, **209**, 279-288 (2002).
12. S. Y. Kim, H. C. Choi, O. B. Yanga, K. H. Lee, J. S. Lee, and Y. G. Kim, Hydrodechlorination of tetrachloromethane over supported Pt catalysts, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, **1995**, 2169-2170 (1995).
13. H. S. Joo and J. A. Guin, Hydrocracking of a plastics pyrolysis gas oil to naphtha, *Energy Fuels*, **11**, 586-592 (1997).
14. J. Weitkamp, Catalytic hydrocracking—mechanisms and versatility of the process, *ChemCatChem*, **4**, 292-306 (2012).
15. D. Munir, M. F. Irfan, and M. R. Usman, Hydrocracking of virgin and waste plastics: A detailed review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **90**, 490-515 (2018).
16. T. C. Ho, Deep HDS of diesel fuel: Chemistry and catalysis, *Catal. Today*, **98**, 3-18 (2004).
17. J. Kim, J.-G. Jang, and Y.-K. Lee, Reactivity of sulfur compounds in FCC decant oils for hydrodesulfurization over CoMoS<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts, *Korean J. Chem. Eng.*, **38**, 1179-1187 (2021).
18. J. L. García-Gutiérrez, G. C. Laredo, G. A. Fuentes, P. García-Gutiérrez, and F. Jiménez-Cruz, Effect of nitrogen compounds in the hydrodesulfurization of straight-run gas oil using a CoMoP/g-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst, *Fuel*, **138**, 98-103 (2014).
19. G. C. Laredo, E. Altamirano, and J. A. De los Reyes, Inhibition effects of nitrogen compounds on the hydrodesulfurization of dibenzothiophene: Part 2, *Appl. Catal. A: Gen.*, **243**, 207-214 (2003).
20. J. Yu, L. Sun, C. Ma, Y. Qiao, and H. Yao, Thermal degradation of PVC: A review, *Waste Manag.*, **48**, 300-314 (2016).

#### Authors

- Ki-Duk Kim; Ph.D., Postdoctoral Researcher, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; kdkim87@kier.re.kr
- Eun Hee Kwon; M.Sc., Research Engineer, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; eun-h90@kier.re.kr
- Kwang Ho Kim; M.Sc., Principal Engineer, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; khkim@kier.re.kr
- Suk Hyun Lim; Ph.D., Senior Researcher, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; imsukhhh@kier.re.kr
- Hai Hung Pham; Ph.D., Postdoctoral Researcher, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; pph93@kier.re.kr
- Kang Seok Go; Ph.D., Principal Researcher, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; ksgo78@kier.re.kr
- Sang Goo Jeon; Ph.D., Principal Researcher, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; sgjeon@kier.re.kr
- Nam Sun Nho; Ph.D., Principal Researcher, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea; nsroh@kier.re.kr