

KIER의 열분해유화 공정 기술과 실증플랜트 소개

*신 대현, 전 상구, 김 광호, 이 경환, 노 남선, 이 기봉

Introduction of KIER Pyrolysis Process and 3,000 ton/yr Demonstration Plant

*Dae-Hyun Shin, Sang-Gu Jeon, Kwang-Ho Kim, Kyong-Hwan Lee, Nam-Sun Roh, Ki-Bong Lee

Key words : Polymer Waste(고분자 폐기물), Pyrolysis(열분해), Process Development(공정 개발), Fuel Oil(연료유), Demonstration Plant(실증플랜트)

Abstract : Since late of 2000, KIER has developed a novel pyrolysis process for production of fuel oils from polymer wastes. It could have been possible due to large-scale funding of the Resource Recycling R&D Center. The target was to develop an uncatalyzed, continuous and automatic process producing oils that can be used as a fuel for small-scale industrial boilers.

The process development has proceeded in three stages bench-scale unit, pilot plant and demonstration plant. As a result, the demonstration plant having capacity of 3,000 tons/year has been constructed and is currently under test operation for optimization of operation conditions.

The process consisted of four parts ; feeding system, cracking reactor, refining system and others. Raw materials were pretreated via shredding and classifying to remove minerals, water, etc. There were 3 kind of products, oils(80%), gas(15%), carbonic residue(5%). The main products i.e. oils were gasoline and diesel. The calorific value of gas has been found to be about 18,000kcal/m³ which is similar to petroleum gas and shows that it could be used as a process fuel.

Key technologies adopted in the process are 1) Recirculation of feed for rapid melting and enhancement of fluidity for automatic control of system, 2) Tubular reactor specially-designed for heavy heat flux and prevention of coking, 3) Recirculation of heavy fraction for prevention of wax formation, and 4) continuous removal & re-reaction of sludge for high yield of main product (oil) and minimization of residue. The advantages of the process are full automation, continuous operation, no requirement of catalyst, minimization of coking and sludge problems, maximizing the product(fuel oil) yield and purity, low initial investment and operation costs and environment- friendly process.

In this presentation, background of pyrolysis technology development, the details of KIER pyrolysis process flow, key technologies and the performances of the process will be discussed in detail.

1. 서론

최근 들어 원유의 현물시장 가격이 배럴당 100 달러 주위를 맴돌고 있다. 고유가 시대의 도래는 이미 예견되었던 일이지만, 에너지자원 빈국인 우리로서는 유일한 국내 자원인 신재생에너지의 보급이 새삼 중요하게 느껴지는 때이다.

지금의 고유가 추세는 1차 및 2차 석유파동 때와는 달리 오래 지속될 것으로 예상되고 있으며, 이에 대한 삼성경제연구소의 분석으로는 원유의 수급 불균형, 달러화 약세, 투기자금 유입, 지정학적 리스크 등을 들고 있다.[1] 그러나 가장 우려가 되는 것은 머지않아 석유 수급의 불균형이 급격히 심화되어 배럴당 200달러 시대가 도래할 것으로 예상되며, 인류는 금세기 안에 석유자원이 고갈되는 상황을 맞게 될 것이다.

국내에서 소비되는 석유제품 중 비에너지 부문, 즉 석유화학산업 부문의 비중이 40%를 상회한다.[2] 국내의 2006년도 플라스틱 수지 생산 규모는 1,500만톤에 이르며, 이중 650만톤 정도가 내수로 소비되었다. [3] 매년 발생되는 플라스틱 양은

460만톤에 이르고[4], 이들의 에너지 잠재량은 현재 우리나라의 신재생에너지 보급량(2006년, 약 523만TOE)[5]의 80% 에 이른다.

폐플라스틱의 재활용 기술의 하나로서 1990년대 중반부터 열분해에 의한 연료유 생산기술이 부각되기 시작하다. 그동안 수많은 기업들이 열분해유화사업에 뛰어들었다가 성공하지 못 하였으며, 그 배경에는 복합적인 원인이 있었겠지만 주된 이유는 기술의 완성도가 부족에 있다고 판단된다.[6]

한국에너지기술연구원(KIER)에서는 자원재활용 기술개발사업단의 과제로 2000년 후반부터 지금까지 8차년에 걸쳐 기술개발을 완료하였다. 1단계에 70톤/년 규모의 Bench Scale Unit(BSU), 2단계에는 360톤/년 규모 Pilot Plant, 그리고 3단계에는 3,000톤/년 규모의 실증플랜트를 개발하였다. 실증 플랜트는 KIER의 연구진에 의해 개발된 우리 고유의 신 공정으로서, 자동화된 연속식 공정이며, 국산 화율 100%를 달성하였다.

저자 : 한국에너지기술연구원 대체연료연구센터
E-mail : dhshin@kier.re.kr
Tel : (042)860-3639 Fax : (042)860-3134

2. KIER 공정의 핵심 기술

2.1 공정의 구성

본 열분해 공정의 흐름은 『원료 투입』 → 『용융 반응』 → 『반응물(기-액) 분리』 → 『열분해』 → 『증류』 → 『가스 소각』으로 이루어지며, 기-액 분리 반응기에서 배출되는 슬러지 재 분해반응으로 구성된다. Fig. 1.은 개략적인 공정흐름도이다.

플랜트는 자동제어 방식으로 운전된다. 원료의 투입여부는 후단 용융반응기의 레벨에 의해 결정된다. 용융반응기는 기-액 분리 반응기로부터 고온의 반응물을 용융반응기로 순환시켜 유지되며, 이때 순환되는 반응물은 용융반응기 내의 반응물의 유동성을 높이는 역할을 한다. 용융반응기로 투입된 원료는 내부 반응물과 혼합되어 용융된다. 용융된 반응물은 기-액 분리반응기로 이송되며, 다시 분해반응기로 순환되면서 분해반응을 일으킨다. 분해 반응기에서 가열되어 분리반응기로 들어오는 반응물 중 충분히 반응된 부분은 오일 증기 상태로 증류탑으로 보내지며, 반응이 충분히 일어날 때까지 계속 순환된다. 기-액 분리반응기 반응물 중에는 원료에 함유된 무기물과 분해반응에서 발생하는 카본이 누적되며, 이들의 제거를 위해 반응기 하부에서 반응물의 일부를 빼내어 완전 열분해처리하며, 잔사는 분말상태로 배출 처리된다. 증류탑으로 들어오는 오일증기는 주제품인 HGO와 LGO로 생산되고, 하부에서 얻어지는 고비점 유분은 다시 반응기로 보내진다. 또한 LPG와 유사한 비유축성 가스는 소각장치에서 처리되며, 상용공정에서는 분해반응기의 연료로 사용되게 된다.

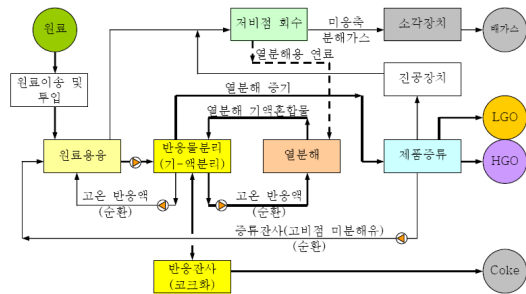


Fig. 1. 실증플랜트 공정흐름 개략도

2.2 핵심 기술

본 공정의 핵심장치로는 용융반응기, 기-액 분리 반응기, 열분해반응기 및 슬러지반응기 등의 반응기류와 고온 반응물 이송용 펌프류가 있다.

용융반응기는 공급되는 원료를 신속히 용융시키고 충분한 유동성을 주어 후단의 전 공정이 펌프 이송에 의한 연속처리 공정이 가능하도록 하는 기능을 갖는다. 용융반응기는 후단의 기-액 분리반응기로부터 순환되는 고온저점도의 반응물에 의해 용융에 필요한 열을 공급받고 높은 유동성을 갖게 된다.

기-액 분리반응기는 반응물을 열분해반응기로 순환시키기 위해 반응물이 체류하는 공간을 제공하고, 동시에 열분해 반응기로부터 돌아오는 증기-액체

혼합물로부터 오일증기를 분리하는 기능을 갖는다. 이 반응기의 온도는 별도의 가열 없이 열분해반응기에서 공급받는 열로 온도가 유지된다.

열분해 반응기는 노(爐) 내부벽면에 관을 배열한 가열로 형태의 반응기이다. 이 반응기는 열분해에서 통상적으로 많이 사용되는 원통교반형 반응기에 비하여 규모 대비 가열면적이 넓고, 복사열에 의한 가열방식으로서 효과적인 반응열의 공급이 가능하다. 또한, 원통형 반응기에서 흔히 일어나는 벽면코킹 현상을 방지할 수 있는 특징이 있다.

고온고점도 반응물의 이송을 위한 펌프는 공정의 핵심 장치로서 펌프 전문 업체와 공동으로 개발한 특수 로터리 기어펌프를 사용하였다.

2.3 공정의 특징

이 공정은 3,000톤/년 이상의 중대규모 플랜트를 위한 공정으로 개발되었다. 대규모 플랜트는 자동제어가 절대적으로 필요하고, 또한 불순물의 제거와 입자 크기의 균일도를 주는 높은 수준의 원료 전처리가 전제되어야 한다.

본 공정의 특징은 다음과 같다.

- 1) 전 공정이 자동화된 연속 공정이다.
- 2) 어느 정도의 PVC를 함유한 원료의 사용이 가능하다.
- 3) 촉매를 사용하지 않는 공정이다.
- 4) 반응기의 내벽에 발생하는 코킹문제를 최소화하였다.
- 5) 제품 수율을 극대화하였으며, 잔류물의 발생을 최소화하였다.
- 6) 증류 공정의 도입으로 제품의 품질을 고급화하였다.
- 7) 타 유사 공정에 비하여 초기투자비 및 운전비용을 최소화하였다.
- 8) 2차공해의 발생을 최소화한 친환경공정이다.

3. 실증플랜트의 개발

3.1 설계 기준(Table 1.)

실증플랜트의 설계는 BSU와 Pilot Plant의 개발 결과를 바탕으로 연구팀이 자체적으로 실시하였다.

규모는 원료 기준 3,000톤/년(10톤/일)으로서, 연간 가동 일수 300일(7,200시간)을 기준으로 하였으며, 연간 예상 생산 제품 양은 고비점유와 저비점유를 포함하여 약 2,253톤, 잔사는 120톤, 가연성가스 450톤이다.

원료는 생활계에서 분리배출되는 폐플라스틱을 재활용하는 사업장에서 2차 발생되는 종말품을 다시 전처리하여 정선된 것을 사용하는 것으로 하였으며, 플라스틱 순도 92%, 무기물 2%, 수분 6%로 가정하였고, 물에 의한 비중분리 방식으로 전처리하였기 때문에 PVC 함량은 무시하였다. 반응공정 온도는 용융반응기 310℃, 기-액 분리 반응기 390℃ 및 열분해 반응기 420℃ 이다. 생성물 조성은 제품(오일) 75%, 가스연료 15% 및 잔사 4%로 예상하였다. 공정의 안전성 확보를 위하여 산업안전보건법에서 규정하는 공정안전관리(PSM) 진단을 받았다.

Table 1. Design Basis of Demonstration Plant

항 목	기 준
플랜트 용량	3,000톤/년(417kg/hr)
원료 규격	플라스틱 92% / 무기물 2% / 수분 6%
반응기 온도	융융 반응 300℃ / 기-액분리 390℃ / 분해 반응 420℃ / 슬러지 반응 430℃
생성물 조성	오일 수율 75.1% / 연료가스 15% / 잔사 4%
제품 종류 및 규격	저비점 오일(<100℃) 5% / LGO(<140℃) 25% / HGO(140<비점<350℃) 70%
공정 안전성	공정안전관리(PSM) 적용(산업안전보건법 49-2)

3.2 플랜트 건설 및 안전 관리

실증플랜트의 건설은 연구팀의 주관 하에 각 부문별로 전문 기업체에 발주를 내어 제작을 하거나 구매를 하고, 설치공사 전문 업체에 의뢰하여 설치하였다.

실증플랜트를 건설함과 동시에 공정안전관리(Process Safety Management) 진단을 실시하였다. PSM은 산업공정에서 발생가능성이 있는 잠재적인 중대 산업사고를 미연에 방지하기 위한 종합적인 안전관리체도로써, 실증플랜트에 대하여 안전보건기술자료 관리, 유해-위험 공정에 대한 위험성 평가, 설비의 완벽한 안전성 확보 및 안전운전 계획 등에 관한 공정안전진단을 실시하였으며, 중대 산업사고의 예방체제를 구축하였다.

공정안전보고서는 산업안전보건법 시행규칙 130조 2항에 따른 것으로서, 사업개요, 공정안전자료, 공정위험성평가, 안전운전계획, 비상조치계획 등이 포함되었다.



Fig. 2. Inside View of Demo. Plant

3.3 가동 및 성능 실험

3.3.1 원료

실험에 사용된 원료는 폐플라스틱을 물질재활용하는 업소에서 발생하는 종말처리품을 전처리 공정을 거쳐 생산된 것으로서, 일부는 수원대학교(종말품 전처리 과제 수행)로부터 공급을 받았고 일부는 재활용업체에서 구입하였다.

사용된 원료는 물을 사용해 비중



Fig. 3. Outside View of Demo. Plant

선별된 것으로서 PE, PP를 주성분으로 하는 필름류이며, 입자 크기는 30mm 이하이다. 각 원료에 대하여 TGA 분석, 공업분석, 원소분석 및 열량분석을 실시하였다. Table 2.는 원소분석결과로서 매우 양질의 전처리 상태임을 보이고 있다. 발열량은 오일의 95% 수준으로서, 무기물 함유로 인해 다소 낮으며, 2번 원료의 경우는 유황분을 약 200ppm 정도 함유한 것으로 분석되었다.

3.3.2 실험 방법

단위 장치들과 공정의 개선을 통해 몇 차례에 걸쳐 완전 자동제어 되는 연속공정으로서 안정적으로 가동하는 목표를 달성하였다. 즉, 공정 전체의 각종 운전 지표를 설계조건대로 정상상태로 유지할 수 있었으며, 주 제품인 연료 등의 물성이 제품의 규격을 만족하는 결과를 보였다.

플랜트의 가동은 1) 가동 준비(원료, 장치, 배관 및 계측기 점검), 2) 가동 개시(start-up), 3) 정상 가동, 4) 가동 종료(shut-down)의 4 단계로 진행된다. 플랜트의 성능은 가동을 개시하여 정상상태에 도달한 후 측정되며, 정상상태는 가동 시작 후 20시간 지나서 도달된다. 주요 성능 지표는 1) 정상상태(steady state)에서 자동 제어에 의한 연속운전 지속 2) 제품 수율(원료 투입량 대비 제품 생산량), 3) 제품의 품질 및 규격성능 실험 4) 생산 가스의 연료로서의 품질, 5) 잔류물의 상태 등이며, 이들의 분석을 통해 플랜트의 성능을 측정하였다.

3.4 성능 실험 결과

3.4.1 플랜트 성능

제품 수율은 플랜트 특성상 수율은 정밀하게 측정하기가 어려웠으나 3회 측정하여 평균한 결과 평균 80% 정도를 보였다. 공정의 에너지 소비율은 투입 원료의 발열량을 기준으로 한 연료 및 전기 사용량

Table 2. Proximate and Elemental Analysis Data of Feeds

Feeds	Kcal/kg	Proximate Analysis(%)				Elemental Analysis (%)				
		H ₂ O	VM	FC	Ash	C	H	N	O	S
Mixed Plastics(I)	10,420	0.18	98.7	0.02	1.1	86.0	12.9	0.09	0.015	0.005
Mixed Plastics(II)	9,730	0.64	95.0	0.26	4.1	81.9	13.3	0.17	0.59	0.02

에 대한 비율로서 약 14.5% 정도였으며, 소방법규 및 PSM 기준상 공정발생가스를 사용할 수 없어서 생산가스 대신 경유를 사용하였다.

생산된 제품은 경유에 해당되는 HGO가 68%, 등유와 휘발유의 중간 정도 비중을 갖는 LGO가 32%를 차지하였다.

3.4.2 제품(연료유)의 품질

Fig. 4.는 생산제품과 시중제품의 비점분포를 비교하여 보인 대표적인 사례이다. 증류탑 상부제품은 색도가 옅고 맑으며, 등유와 휘발유의 중간정도 비중을 보였으며, 하부 제품은 색도가 짙은 갈색이고 경유와 유사한 비점분포를 보였다. 이들 제품을 활성탄으로 처리하여 정제된 제품은 맑고 투명해졌으며, 활성탄 철 정도가 클수록 양호한 상태를 보였다. 이들의 색깔은 방향족 고분자 물질들에 의한 것으로 추정되며, 활성탄 처리하면 쉽게 개선되는 것으로 보아 그 양은 매우 적은 것으로 추정된다.

증류탑 상부 제품(LGO)과 중간 제품(HGO)을 한국석유품질원(조치원)에 의뢰하여 분석하였다. 분석결과는 유럽의 자동차용 디젤(EN 590) 및 휘발유 규격(EN228)과 비교하였다. HGO의 경우는 대부분의 항목을 만족시켰으며, 초류점과 유황 함량만이 규격을 벗어났다. LGO의 경우는 유황분 함량과 증류성상에서 규격을 만족하지 못하였다. 증류 성상은 증류탑의 운전조건 조절만으로도 규격에 맞출 수 있을 것으로 판단된다.

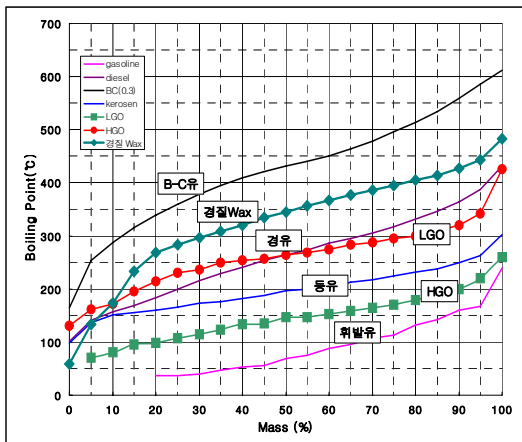


Fig. 4. Comparison of b.p. Distribution to Conventional Petroleum Fuels

3.4.3 가연성 가스

가스의 생산량은 실측하지 않고 오일 생산량과 잔류물 생산량(추정)으로부터 추정하였다. 가스 생산량은 원료투입량의 약 17% 정도로 추정되었으며, 발열량은 9,150 kcal/kg (18,341 kcal/Nm³)으로서 LPG 발열량의 80%정도였다. 가스의 조성은 C₁ 9.6%, C₂ 8%, C₃ 16%, C₄ 11%, C₅이상이 9%를 차지하였으며, 수소의 함량도 약 8%를 차지하였다. 그 외에도 CO₂ 가스의 함량이 약 30%를 차지하였는데, 이는 용융반응기의 내부압력 조절이 잘 안 되어 원료 투입구를 통해 흡입된 공기에 의한 영향으로 보인다.

3.4.4 잔류물

반응기로부터 인출된 슬러지를 슬러지반응기에서 완전히 재 열분해하여 분말상태의 잔류물로 만들어 배출하도록 하고, 이에 대하여 공업분석, 원소분석 및 발열량 분석을 실시하였다.

잔류물에 대하여 공업분석, 원소분석 및 발열량 분석결과로서, VM과 회분이 각각 13.1%, 25% 이고 발열량이 5,920kcal/kg으로서 저급 유연탄과 유사한 물성을 보였다. 따라서 이는 미분탄을 사용하는 발전소 등의 연료로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서 개발한 공정기술은 국내에서 개발된 타 공정이나 업체들이 보급을 시도하였던 기술은 물론 일본에서 상용화된 나가타 플랜트, 삿포로 플랜트, 도양 플랜트 등과도 공정의 흐름 측면에서 완전히 차별화된 신기술이며, 제품의 품질, 수율 및 플랜트 비용 등에서도 매우 우수한 기술이라고 평가할 수 있다.[6]

또한 개발된 실증플랜트는 규모에 있어서 상용플랜트보다 경제성이 충분히 있기 때문에 더 이상의 기술개발이 없이 상용화 보급이 가능한 상태이며, 해외진출도 가능하다고 판단된다.

국내에서 발생되는 465만 톤에 이르는 폐플라스틱 중 약 150만 톤을 열분해할 경우 연간 100만 TOE 이상의 원유 수입대체효과가 있으며, 국내의 신재생에너지 보급률을 1%정도 높일 수 있는 양이다. 이의 달성을 위해서는 5,000톤/년 규모의 플랜트 300기의 건설이 필요하여 그에 따른 산업적·경제적 효과도 크게 기대된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 환경부가 공동으로 지원하는 자원재활용기술개발사업(21세기 프런티어연구개발사업)의 일환으로 수행되었음을 알려드립니다.

References

- [1] 삼성경제연구소, 2007, “유가 급등의 원인과 향후 전망”, CEO Information, 제632호
- [2] 서울경제신문 기사(2008. 2. 24.), “정유사 ‘팔수록 손해’ 병커C유 감산돌입”, 서울경제신문사
- [3] 산업자원부 통계자료, 2007, “2006 플라스틱 품목별 생산 및 출하”, 산업자원부
- [4] 국립환경과학원, 2006, “2005 전국 폐기물 발생 및 처리현황”, 환경부
- [5] 신재생에너지 통계자료, 2006, “2006 신재생에너지 통계”, 에너지관리공단
- [6] 신대현 외, 2006, “고분자폐기물의 연속식 열분해유화 기술 개발”, 한국에너지기술연구원 보고서, PP 31~91,