

廢合成樹脂류의 熱分解 油化 技術 動向[†]

*申大鉉 · 盧南善 · 金性洙 · 金廣鎬 · 全相九

韓國에너지技術研究院 廢棄物에너지연구센터

A Review on R&D and Commercialization of Oil Recovery from Waste Plastics by Pyrolysis[†]

*Dae-Hyun Shin, Nam-sun Nho, Sung-Soo Kim, Kwang-Ho Kim and Sang-Gu Jeon

Waste Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research(KIER)

요 약

최근 정부의 저탄소 녹색성장 정책, 신재생에너지의무할당제(RPS)의 시행 추진, 국제 유가의 지속적인 상승 등으로 인해 폐자원 에너지화에 대한 관심이 높아지고 있다. 이와 관련하여 에너지를 많이 소비하는 업계에서는 폐기물 고품연료의 사용을 추진하고 있고, 특히, 폐플라스틱의 열분해유화기술은 중소, 중견기업들이 국내에서 개발된 기술의 상용화를 적극적으로 검토하고 있다. 본 논문에서는 폐플라스틱 열분해 기술의 소개와 폐플라스틱 자원, 기술 개발 및 상업화 등에 대하여 국내의 현황을 소개하였다.

주제어 : 폐플라스틱, 열분해, 유화, 기술동향

Abstract

Recently, the waste energy utilization has become the main interest in energy industries, due to high oil prices, the low carbon, green growth policy and the RPS (Renewable Portfolio Standards) of our government. Therefore, energy guzzling companies such as district heating companies, textile industries are replacing energy to RDP/RPF. Especially, a lot of big companies are carrying out survey to commercialize the waste plastics pyrolysis technologies developed in Korea. In this paper, status of the pyrolysis technology of Korea were reviewed overall including basis of technology, waste plastics resources, research & development, and commercialization.

Key words : waste plastics, pyrolysis, oil recovery, R&D review

1. 서 론

최근 국제원유 현물 가격이 70달러 대의 안정세를 유지하고 있지만, 배럴당 150달러의 초 고유가를 경험한 바 있어 원유가격에 대한 불안감은 완화되지 않고 있다. 이와 같은 이유로 인해 에너지 다소비 업체들이 폐자원에너지로의 대체를 서둘러 추진하고 있으며, 폐플라스틱을 이용하여 직접 오일을 생산하는 폐플라스틱 유화 기술의 상용화를 위한 움직임이 활발하다.

폐플라스틱의 발생원은 크게 생활계 폐플라스틱, 사업장 폐플라스틱, 농촌 폐비닐 및 어촌의 폐어구류로 구분된다. 생활계 폐플라스틱 중 상당부분이 물질 재활용이 용이하도록 용기, 필름류 및 발포 스티로폼 등으로 분리되어 배출되며, 포장재 등 포장재의 상당부분이 일반폐기물에 포함되어 발생된다.

분리배출로 수집되는 대부분의 폐플라스틱은 재활용이 용이한 열가소성 플라스틱으로서, 각종 용기류와 비닐하우스용으로 사용되었던 농촌 폐비닐은 대부분 물질 재활용 방식으로 재활용되고 있다. 그러나 포장재로 사용되었던 포장재 필름류와 농업용 멀칭 폐비닐, 폐어구류 및 사업장에서 배출되는 혼합재질의 폐플라스틱(다

[†] 2010년 1월 4일 접수, 2010년 1월 20일 1차수정
2010년 2월 1일 수리

*E-mail: dhshin@kier.re.kr

층 필름류) 등은 물질재활용이 불가능하여 RPF로 가공되어 시멘트 킬른의 보조 연료로 사용되는 정도이며, 고부가가치를 창출할 수 있는 열분해 유효에는 극히 일부만이 이용되는 부분은 극히 일부이다.

국내의 폐플라스틱 열분해유화 기술은 1990년대 중반부터 사업화를 위한 움직임이 있는 이후 지금까지 100여 개에 달하는 업체들이 사업을 추진했던 것으로 추정되며, 국가 연구개발도 약 20여건 이상 수행된 바 있다. 그럼에도 불구하고 3~4개의 소규모 플랜트가 가동되고 있을 뿐 명실상부한 신재생에너지 산업으로 정착되지는 못 하였다.

그러나 최근 정부의 강력한 녹색산업 정책과 자본력과 기술력을 갖춘 대기업들의 관련 기술의 상업화에 관심을 갖고 지대한 관심을 갖고 있어서 기술 발전의 전망이 매우 밝다고 판단된다.

2. 발생 및 처리 현황

국내에서 소비되는 석유제품 중 비에너지 부문, 즉 석유화학산업 부문의 비중이 40%를 상회한다. 국내의 2006년도 플라스틱 수지 생산 규모는 1,600만 톤에 이

르러 세계 4위의 생산국이며, 국내 소비량은 650만 톤에 달했다. Table 1은 2006년도 국내의 열가소성 플라스틱에 대한 생산 및 소비량을 나타낸 것이다.¹⁾

플라스틱은 Table 2와 같이 열적 성질에 의해서 크게 열가소성 수지와 열경화성 수지로 구분되며, 그 종류를 세분하면 약 100여 가지에 이르지만 일상생활에서 쉽게 접할 수 있고 공업적으로 대량 이용되는 플라스틱은 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), 폴리스타이렌(PS), 폴리프로필렌(PP), 폴리염화비닐(PVC) 및 에이비에스(ABS) 수지 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET) 수지 등의 7대 범용수지로서 국내에서 소비되는 플라스틱의 대부분을 차지하고 있다.

열가소성 플라스틱의 특징 중 하나는 각종 제품생산 활동에 사용된 플라스틱의 대부분이 짧은 기간에 폐기물로 발생되는 것이다. 2000년 이후 국내의 폐플라스틱 발생량은 매년 평균적으로 6.5%의 비율로 증가하여 2010년에는 약 570만 톤의 폐플라스틱이 발생된 것으로 전망되며, 발생원별로는 사업장 배출시설계 폐기물로 배출되는 폐플라스틱의 발생량 증가율이 8.1%로 가장 높게 나타났다. 폐플라스틱 중에서 열분해에 의한 오

Table 1. Production and Consumption of Plastic Resins in Korea(2006)¹⁾

(Unit : t/y)

Resins	Production	Shipment	Stocks	Consumption	Export
HDPE	1,934,891	1,947,980	1,030,235	920,159	1,027,821
LDPE	1,727,556	1,719,984	1,540,951	1,026,431	693,553
PP	3,040,476	3,022,822	2,555,416	1,510,492	1,512,330
PS	1,009,413	1,011,926	614,835	413,882	598,044
ABS	1,077,350	1,070,652	467,794	194,150	876,502
PVC	1,203,383	1,204,454	618,038	680,943	523,511
PET	2,663,158	777,400	556,138	188,087	589,313
Others	3,232,464	3,096,742	2,397,028	1,582,187	1,514,555
Totals	15,888,691	13,851,960	9,780,435	6,516,331	7,335,629

Table 2. Classification of plastics resins by thermal behavior

구 분	구 조	종 류
열경화성수지 (Thermosetting resin)	유동성을 띠는 고분자에 촉매 등을 가해서 가열하면 화학반응에 의해 경화됨. 경화된 수지는 재차 가열하여도 유동상태로 되지 않고 고온 가열하면 분해되어 탄화되는 비가역적 수지	초산비닐(PVAC), 불포화폴리에스테르(UP), 폴리우레탄(PUR), 페놀수지(PF), 우레아수지(UF), 멜라민수지(MF), 에폭시수지 등
열가소성수지 (Thermoplastic resin)	열을 가하면 용융 유동하여 가소성을 갖게 되고, 냉각하면 고화하여 성형되는 것으로서, 이와 같은 가열용융, 냉각고화 공정의 반복이 가능하게 되는 수지	폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), 메타크릴(PMMA), 폴리염화비닐(PVC), 폴리염화비닐리덴(PVDC), ABS 수지

일화가 가능한 것은 열가소성 수지로서 7대 범용수지인 LDPE, HDPE, PP, PS, ABS가 국내 폐플라스틱 발생량의 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 보고되어 있으며, 종류별 폐플라스틱의 발생량은 PP>HDPE>LDPE>PET>PVC>PS>ABS의 순서인 것으로 보고되었다.²⁾

폐플라스틱의 발생원은 크게 생활계 폐플라스틱, 사업장 폐플라스틱, 농촌 폐비닐 및 어촌의 폐어구류로 구분된다. 생활계 폐플라스틱은 재활용을 위해 용기, 포장재 필름 및 EPS로 구분하여 분리·배출하는 제도를 운영하고 있으며, 포장재의 경우 아직도 상당부분이 일반 폐기물과 함께 배출되고 있다.

2007년도 환경부의 폐기물 통계연감(Table 3)에 따르면 2006년도 폐플라스틱 발생량은 농촌 폐비닐 및 해양 폐플라스틱 발생량을 제외하고 약 465만 톤에 달하였으며, 생활계 폐기물과 사업장 폐기물이 90% 이상을 차지하고 있다. 처리 방법에 있어서는 30.7% 정도만이 재활용 되고 있고, 나머지는 소각(51.2%)과 매립(18.1%)으로 처리되고 있는 것으로 조사되었다.²⁾

폐플라스틱은 생활계, 사업장 및 건축 분야 외에도 농업 폐비닐과 해양 폐플라스틱이 있다. 농촌에서는 작물 재배용으로 사용되는 폐비닐이 매년 36만 톤(수집상태 기준) 정도 발생하고 있고, 수집된 채 처리되지 못하여 적체된 양도 60만 톤 이상 되는 것으로 알려져 있다. 또한 연근해에 투기되는 PE, PP, EPS, 합성섬유 등의 폐어구류가 매년 4만 톤 정도이고, 이미 투기된 합성수지계의

폐어구류는 약 200만 톤에 이르는 것으로 알려졌다.

Table 4는 폐플라스틱의 발생원별 특징 및 처리현황을 종말품, 농촌 폐비닐, 사업장 폐플라스틱, 해양 폐플라스틱의 4가지로 구분하여 나타낸 것으로서, 공급 가능량과 경제성 측면에서 열분해 유화용 원료로 가장 적합한 것은 종말품과 농촌 폐비닐 중의 멀칭용 폐비닐 및 사업장의 필름류라고 판단된다.

3. 재활용 기술^{3,4)}

현재까지 개발된 폐플라스틱의 재활용 기술은 Fig. 1과 같이 크게 물질재활용(material recycle), 석유화학 원료나 연료유를 생산하는 화학적 재활용(chemical recycle) 그리고 소각에 의해 열을 회수하여 이용하는 열적재활용(thermal recycle) 기술로 분류된다.

일반적으로 열가소성 플라스틱을 대상으로 하고 있는 물질재활용(material recycle)은 단순재생(primary recycle)과 복합재생(secondary recycle)으로 구분할 수 있다. 단순재생이란 수집한 폐플라스틱을 선별, 파쇄, 세척 과정을 통하여 재생가능한 후에 다시 성형재료로서 사용하는 것을 의미하며, 주로 단일 종류의 비교적 양호한 성질을 가진 폐플라스틱에 국한되는 기술이다. 복합재생은 단순 재생되지 않는 낮은 품질의 폐플라스틱을 저급의 성형제품으로 재생 사용하는 것을 의미하며, 플라스틱 혼합물을 그대로 처리하여 사용한다.

Table 3. Disposals of waste plastics by sources in 2006²⁾ (unit : t/y, %)

발생처	생활계폐기물		사업장폐기물		건축폐기물		합 계	
소 계	1,929,208	41.5	2,354,579	50.6	366,314	7.9	4,650,101	100
재활용	588,380	30.5	716,021	30.4	123,224	33.6	1,427,625	30.7
소 각	629,370	32.6	1,543,549	65.6	209,583	57.2	2,382,502	51.2
매 립	711,458	36.9	95,009	4.0	33,507	9.1	839,974	18.1

Table 4. Characteristics and disposal trends of waste plastics by sources

발생원	특 징	대표적인 처리 현황
종말품	가정, 사업장에서 분리, 수거되는 용기류 및 포장류 폐플라스틱	<ul style="list-style-type: none"> • 재활용사업장(협회등록)⇒ RPF 업체, 유화 업체 • 재활용사업장 (미등록)⇒ 매립, 소각장
농촌 폐비닐	농촌지역에서 발생하는 하우스용 및 멀칭용 폐비닐	<ul style="list-style-type: none"> • 하우스폐비닐 ⇒ 재활용 사업자(유상) • 멀칭폐비닐 ⇒ 환경자원공사(중간 가공/재활용)
사업장 폐플라스틱	사업장에서 발생하는 폐합성수지류(폐고무류 포함)	<ul style="list-style-type: none"> • 단일재질 ⇒ 재활용 업체(유상) • 복합재질 ⇒ 자가위탁 중간 처리(처리비 지불)
해양 폐플라스틱	해양에서 수거되는 로프, 그물, 부표 등의 폐플라스틱	<ul style="list-style-type: none"> • PS(부표) ⇒ 위탁처리(비용 지원) ⇒ 재활용 업체 • PE, PP(그물, 로프) ⇒ 중간처리업체

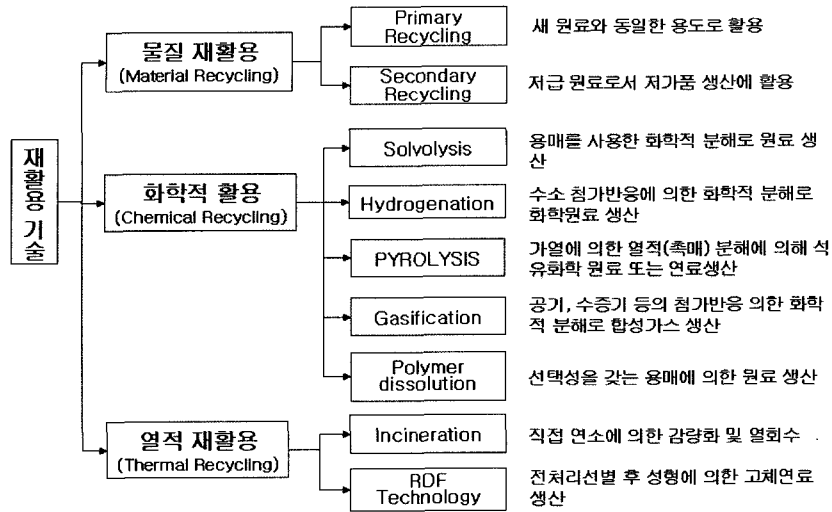


Fig. 1. Classification of waste plastics recycling⁵⁾

재생원료화 기술은 다양한 종류의 폐플라스틱이 혼합물 상태로 배출됨으로써 수집하는데 한계가 있으며, 여러 종류가 혼합된 폐플라스틱의 경우 상 분리로 인하여 물성이 원래 플라스틱 자체의 물성보다 떨어지고, 또한 재생 방법에 의해 재사용된 후에도 다시 폐플라스틱으로 배출되기 때문에 궁극적인 처리방법이 못된다.

폐플라스틱은 종류에 따라 큰 차이가 있지만 대부분이 8,000~11,000 kcal/kg의 높은 발열량을 가지고 있으므로, 소각 열을 회수하여 이용하는 방법이 열적 재활용 방법이다. 이 방법은 폐플라스틱을 분리하거나 분쇄하여 그대로 소각시키는 기술과 고형연료, 분체연료, 슬러리 연료 등으로 가공하여 소각하는 기술로 대별된다.

폐플라스틱을 소각하여 에너지를 회수하면 폐기물의 부피를 상당히 줄일 수 있을 뿐 아니라 회수된 에너지에 해당하는 연료 사용량을 감소시킬 수 있다는 경제적인 장점이 있다. 그러나 이 방법은 소각처리 시에 배출되는 유해가스에 의한 2차 환경오염을 유발하며, 그로 인해 사회적 저항을 불러일으킨다. 따라서 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 비롯한 대부분의 국가에서는 폐플라스틱의 처리 및 재활용에 대한 종합적인 대처 방안으로서 소각에 의한 에너지 회수기술이 포함되어 있으나 환경보호의 차원에서 기존 소각설비의 운전을 동결한다든가, 소각설비의 신설과 증설을 억제하려고 하는 움직임이 세계적인 추세가 되고 있는 실정이다.

화학적재활용(chemical recycle)은 화학적인 방법을 이용하여 Monomer, Oligo- mer 등의 플라스틱 원료

화합물, 석유화학 원료, 액상 및 기상의 연료 등으로 전환하는 재활용 방법을 의미하며, 크게 열분해 방법과 촉매, 용매, 초임계 유체 등을 이용하는 화학분해 방법으로 구분할 수 있다.

화학적 재활용 방법은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 다양한 기술이 소개되어 있으나 기술적 어려움과 경제성 등으로 기술개발이 활성화되지 않고 있다. 그러나 우리나라는 고유가와 열분해기술에 의해 생산된 연료유가 신재생에너지로 분류되는 특수 환경에 힘입어 연료유를 생산하기 위한 열분해 기술만이 기술개발과 상용화를 위한 노력이 활발히 진행되고 있다.

4. 열분해 기술

산소가 없는 조건(환원성 분위기)에서 플라스틱, 즉 고분자 물질을 가열하면 거대 분자들의 탄소사슬이 끊어지는 분해반응이 일어나 분자량이 작은 여러 개의 분자로 나뉘게 되는데, 이러한 일련의 현상을 열분해 반응이라 일컫는다.

열분해 반응에서는 반응온도에 따라 분해반응속도가 달라지므로 반응온도 조건을 조절하여 원하는 생성물을 얻을 수 있다. 반응온도가 350~450°C인 조건에서는 반응속도가 느려서 탄소가 큰 액상의 기름이 주로 생성되는데, 이를 저온 열분해라 한다. 온도가 높을수록 탄소수가 짧게 끊어져 가스의 생성이 증가하며, 코크의 양도 증가한다. 또한 생성된 코크는 반응기 내벽에 침착되

어 운전상에 문제를 일으키므로 반응온도를 400~450°C 범위로 제한한다. 국내·외를 막론하고 대부분이 400°C 내외에서 반응시키는 저온 열분해 기술의 개발에 초점을 맞추고 있는데, 그 이유는 액상 제품의 생산량을 극대화하는데 목표를 두기 때문이다.

저온 열분해 반응에서는 HDPE나 LDPE를 원료로 하면 분해가 덜 되어 탄소수가 큰 성분들이 많이 발생되고 이는 냉각시키면 페이스트 상태의 왁스로 된다. 왁스의 생성을 막기 위해 열분해 반응기 후단에 촉매 반응기를 두는 접촉분해 반응기를 두기도 한다. 그러나 촉매 층은 반응 중에 생성되는 탄소성분들에 의해 쉽게 활성이 떨어지는 문제가 있어 촉매 반응기를 쓰지 않고 왁스와 같은 비점이 높은 성분을 분리하여 열분해반응기로 재순환하는 공정을 이용하는 것이 보편적이다.

PE나 PP는 탄소수가 큰 Paraffin이나 Olefin이 생성되고, PS의 경우는 Mono-mer, Dimer, Trimer 등의 혼합물이 생성된다. PVC의 경우는 다른 플라스틱과는 달리 2단계에 걸쳐 일어나는 환화축중합 반응이다. 먼저 230°C 정도에서 Cl이 HCl 형태로 발생되며, 400°C 부근에서 방향족 계통의 생성물이 얻어진다.

반응에 소요되는 에너지는 크게 원료의 온도를 반응온도로 올리는데 필요한 열, 고체플라스틱이 액상으로 용해되는데 필요한 용해열, 분해반응에 필요한 반응열 및 오일성분이 기화되는데 필요한 증발 잠열로 구분된다. 플라스틱 종류에 따라서 에너지 소요량이 다르지만 대략 200~350 kcal/kg이 소요된다.⁶⁾

일반적으로 열분해 유화과정에서는 혼합폐플라스틱을 원료로 하며, 생성물은 크게 가스, 액체(오일), 고체 잔류물 등 3가지 부류의 제품이 얻어진다. 가스는 상온에서 응축되지 않는 비 응축성 성분으로서 탄소수가 1-4인 올레핀류와 수소가 주성분이다. 액상 생성물은 열분해 공정에서 생산하고자 하는 주 생성물로서 저비점부터 고비점 성분이 혼합된 기름이 생산된다. 분해공정에서 촉매를 사용하면 분해반응이 촉진되어 생성물은 휘발유 성분의 경질 오일이 많이 생성되는 반면 가스성분이 많이 생성되어 오일의 수율을 떨어뜨리는 문제가 따르고, 촉매의 활성이 쉽게 떨어지는 것도 해결되어야 할 숙제로 되어 있다.

열분해 유화처리 공정은 회분식 공정, 만연속식 공정 및 연속식 공정으로 구분할 수 있다. 회분식 공정은 회분식 반응기의 사용을 기본으로 하고 2,000톤/년 이하의 소규모 플랜트에 주로 이용된다. 원료를 반응기에 일정량 투입하고 투입된 원료가 모두 반응되도록 하며, 반응이 끝나면 반응기에 남아 있는 잔류물을 제거한 후

다시 원료를 투입하는 과정을 반복한다. 이 경우 원료를 재투입하기 전에 반응기를 적절한 온도까지 낮춘 다음 다시 원료를 투입하게 되고 원료 자체도 파쇄를 하지 않고 인력에 의해 투입하는 공정도 있다. 또한 회분식 반응기를 사용하기 때문에 반응기 가열방식도 반응기의 외벽을 직화 또는 열풍으로 가열하는 가마솥 형태의 가열방식을 택하고 있다.

만연속식 공정은 회분식 공정을 좀 더 개선한 것으로서 일정시간 간격으로 원료를 투입하며, 반응기내 잔류물의 배출은 원료의 투입을 여러 차례 실시한 후 실시한다. 따라서 원료를 투입할 때 반응기의 온도를 크게 낮출 필요가 없고, 잔류물의 배출 주기도 원료의 무기물 함량에 따라 달리하며, 그 주기를 길게 하기 위해서는 깨끗한 원료를 사용해야 한다.

연속식 공정은 5,000톤/년 규모 이상의 대규모 플랜트를 대상으로 한다. 원료의 투입, 열분해 반응, 잔류물의 배출 및 처리, 제품의 정제 등을 연속적으로 실시하는 것을 기본으로 한다. 이 경우는 거의 대부분의 공정이 자동화되며 따라서 플랜트의 설치를 위한 초기 투자비가 많이 소요되는 반면 운전 인력의 감소 등으로 운전 비용이 적게 들고, 제품의 품질이 좋다는 장점이 있다.

5. 열분해 유화기술 현황

5.1. 국내 현황⁷⁾

우리나라의 열분해 유화기술 역사는 1990년대부터 시작되어 이제 20년을 바라보고 있는데, 안타깝게도 아직까지 국내 시장에 정착되지 못 하고 있다.

그 동안 기술개발이 진행된 과정을 살펴보면 1990년대 중반부터 기업들이 기술개발과 보급을 주도하기 시작하였고, 연구기관과 대학들이 관심을 갖고 국가사업으로 기술개발에 참여하기 시작하였다. 그러나 민간 기업체들은 벤처기업 형태로서 자금 확보에 주력하고 기술의 완성을 위한 노력이 부족하였으며, 결국 열분해 기술에 대한 사회적 인식을 떨어뜨리는 결과만을 낳았다. 정부 기술개발 사업의 경우 심도 있는 기획 사업을 거치지 않고 다양한 기술과 다양한 종류의 원료를 대상으로 한 기술개발로서 선택과 집중이 부족한 단기 연구가 수행되었으며, 이로 인해 뚜렷한 성과를 내지 못한 것으로 보인다.

Table 5는 1990년 이후부터 정부부처 연구사업으로 수행된 열분해 관련 기술개발과제들을 보인 것으로서, 전처리 기술과 열분해 기술로 구분하여 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 전처리 기술의 경우 교과부 사업으

Table 5. R&D activities of waste plastics pyrolysis funded by Korean Government

구 분	과제명	연구 기간	수행기관	연구비 (백만원)	비 고
전처리기술 분야	근적외선 분광법을 이용한 폐플라스틱 분리선별 기술개발	'00-'05	기술표준원	469	교과부
	마찰하전형 정전선별에 의한 혼합 플라스틱 재질별 분리 기술	'00-'08	한국지질자원연구원	1,139	
	풍력/비중선별에 의한 혼합 폐플라스틱 재질별 분리기술 개발	'00-'08	수원대	1,082	
열분해기술 분야	폐기물열분해 반응 연구	'88-'90	한국에너지기술연구원	115	지경부
	폐플라스틱 유동층 열분해 공정개발 연구	'91-'93	한국에너지기술연구원	110	
	폐플라스틱 열분해 상업화 공정 개발	'95-'97	LG화학	1,230	
	페타이어 오일화 공정 및 플랜트화 기술개발	'96-'97	한국에너지기술연구원	410	
	화염열분해를 이용한 열경화성 수지계 폐기물의 청정연료 가스화 기술개발	'96-'97	한국기계연구원	402	
	폐고무류의 초임계유체 열분해 기반 기술 개발	'97-'99	서강대	145	
	고분자 폐기물 열분해 공정의 탄소 침적 방지 기술	'00-'02	고려대	240	
	촉매 분해를 이용한 폐유-폐플라스틱의 고급 연료 유화 기 술 연구	'96-'98	한국에너지기술연구원	570	
	상용화규모의 폐플라스틱 유화시스템 실증연구	'04-'05	리엔텍	1,978	
	저급 폐플라스틱의 길튼형 열분해설비(3톤/일)를 이용한 고급 정제유 생산 기술 개발	'06-'09	동명알피에프	3,700	
	Polyolefin 및 가용성 혼합 폐플라스틱으로부터 열분해를 통한 BTX-aromatics의 회수	'07-'09	서울시립대	150	
	마이크로파 가열식 페타이어 열분해 기술개발	'05-'08	한국에너지기술연구원	1,103	
	디스크 이동식 페타이어 열분해 실증 공정개발	'06-'09	기경아이앤씨	3,328	
	고분자 폐기물 열분해 오일의 고급화 기술개발	'04-'07	한국에너지기술연구원	627	
	혼합폐플라스틱으로부터의 대체 연료유 생산기술에 대한 실증연구	'03-'05	(주)삼신기계	777	
	폐플라스틱(PE, PP 등)의 초임계 열분해 기술개발	'01-'03	서강대	40	
	폐플라스틱류로부터 대체연료유 생산을 위한 상용화기술 개발	'01-'04	(주)리엔텍	1,468	
	오염된 PS계 폐플라스틱의 화학원료화 기술개발	'00-'10	한국화학연구원	1,203	
	고분자 폐기물의 연속식 열분해 유화 기술개발	'00-'06	한국에너지기술연구원	7,200	

로 3건이 수행되었고 투자된 연구비는 약 27억 정도이다. 이 중 2개 과제는 원료물질 회수에 관한 것이고, 수원대에서 수행한 과제만 열분해 원료를 생산하는 기술이다. 열분해 기술의 경우 20개 과제로 약 250억 원이 투자되었으며, 이 중 지경부(신재생에너지센터) 사업으로 18개 과제가 수행되었고, 교과부 과제로 2개과제가 수행되었다. 그러나 대상 원료와 대상 기술이 과도하게 분산되었음을 볼 수 있다.⁸⁻¹¹⁾

폐플라스틱의 전처리 기술은 열분해 공정의 원료로서 적절한 상태로 가공하기 위한 기술로서, 열분해로 양질의 기름을 생산하기 위해서는 반드시 수준 높은 전처리 공정을 거쳐야 한다. 따라서 어떤 형태로든 전처리 기술과 열분해 기술이 함께 고려되었어야 하는데 그렇지 못 했다. 열분해 기술의 경우 과제 수행 건수는 많으나, 수행기간이 3-4년으로 제한되어 있으며, 핵심기술이 매우 다양함을 보이고 있다. 결국 선택과 집중 차원에서

적절히 대응하지 못 했다고 판단된다.

1990년대 중반부터 2000년대 중반까지 50여개의 중소기업체가 기술개발 및 보급 활동을 추진해왔다. 일부 기업체의 경우 자체적으로 개발한 기술을 보급하고자 하였지만 대부분이 외국의 기술을 모방하거나 외국에서 개발 중인 기술을 들여와 국산화하는 방식으로 사업화를 추진하였다.

모든 기술들이 혼합폐플라스틱을 원료로 한 기술들로 조사되었으나 열분해 공정의 개발과 플랜트 판매에만 노력을 기울이고, 원료의 전처리에 대해서는 대부분이 소홀히 하는 것으로 조사되었다. 이들이 건설하였던 플랜트 규모는 1톤/일 이하의 규모에서 6,000톤/일 규모까지 다양하다. 그러나 상업적 가동을 성공한 사례는 보고된 바 없다.

공정 운전 방식은 삼신기계, 한국로이코(반연속식) 등이 연속식이며, 그 외에는 모두 회분식 공정이다. 반응기의 형태는 대부분이 교반기가 달린 수직원통형 반응기(CSTR)이며, 왁스 문제를 해결하기 위해 촉매를 사용한 경우들이 있다. 삼신기계의 경우는 원통형 반응기와 열풍으로 가열하는 Shell & Tube 열교환기 방식의 반응기를 조합한 형태이며, (주)리엔텍은 입자 형태의 촉매 층을 갖는 반응기와 촉매 재생반응기를 결합한 형태의 반응기로 운전되는 공정으로 알려졌다.

Table 6은 최근 들어 기술 보급을 추진하거나 사업 가동을 하고 있는 것으로 알려진 업체들의 현황이다. 동명알피에프는 로터리킬른을 이용하는 회분식 공정으로서, 2000년대 초부터 기술개발을 추진하여 최근 공정을 완성하고 상업적 생산(1톤/일 1기, 1.5톤/일 1기)을 하고 있다. (주)성진유화에서는 2007년 7월경 부산시에 있는 생곡매립장에 전처리 원료 기준 40톤/일 플랜트를 완공하고 약 2년간에 걸쳐 공정 개선을 실시한 것으로 알려져 있으나 알려졌으나 그 성능은 발표된 바 없다. (주)

문경에코테크 공정은 다단 스크루 반응기를 도입한 연속공정이며, 상업적 가동은 하지 않고, 광주광역시에 민간투자자로 플랜트 건설을 추진하고 있는 것으로 알려졌다. (주)에스알앤씨는 2008년도에 기존 업체의 기술을 인수하여 시작한 신생 업체로서 수직

원통형 반응기를 이용하여 상업적 생산을 하고 있으며, 공정 개선의 일환으로 연속공정화를 추진 중이다.

5.2. 국외 현황^{12,13)}

열분해 유화 기술은 1990년도 초부터 혼합폐플라스틱의 전처리 분야에 대한 기술개발과 함께 주로 독일과 일본에서 집중적으로 연구개발에 대한 투자가 이루어졌다. 그러나 독일의 경우는 경제성이 낮다는 이유로 상업화를 포기하였으며, 일본의 경우는 지자체와 민간 기업들이 협력하여 2000도까지 상업화를 지속적으로 추진했었다.

폐플라스틱의 분리수거 체계를 확립한 독일은 1990년대 중반에 이미 BASF사에서 CSTR형 플라스틱 용융조와 튜브 형태의 열분해 반응기를 채택한 18,000톤/년 규모의 플랜트를 성공적으로 개발하였고, Kohleol Anlage Bottom GmbH사와 Eckelman 등에서도 상용 규모의 플랜트를 건설하여 성공적으로 운영한 바 있다.

1990년대에 「포장법령」(Package Ordinance, 1991), 「생산물재활용 및 폐기물관리법」(Product Recycling & Waste Management Act, 1994), 「폐기물관리법」(Waste Management Act, 1986) 등을 제정하고, DSD(Dual Systems Deutschland)의 설립을 통하여 폐플라스틱의 분리수거 체계를 확립한 독일은 현재 물질재활용 확대 정책을 채택하고 있고, 일본과 유사하게 물질재활용이 불가능한 부분에 대해서는 처리비용이 저렴한 철강 산업, 시멘트 산업 등에 폐플라스틱을 재활용하도록 하고 있어서 열분해 유화기술이 크게 활성화되지 못하고 있

Table 6. The representative firm of Korea in waste plastics pyrolysis

업 체 명	규모(톤/일)	특 징	비 고
동명알피에프(주)	2.5	- 로터리킬른 반응기 - 회분식 운전	종말품을 이용, 생산 판매 중
(주)문경에코테크	20	- 다단 스크루 반응기 - 연속식 공정, 수율 40% 내외	2008년 5월 준공, 광주광역시에 민자사업 추진
(주)성진유화	40	- 오일 수율 43% - 수직 원통형 반응기	2007년도 7월 완공, 부산 생곡매립장내 건설
(주)에스알앤씨	10	- 수직 원통형 반응기 - 전기 가열 및 회분식 운전	연속공정 전화 추진 중

는 실정이다.

독일에서 개발된 페플라스틱의 열분해 오일화 공정은 BP Chemical Pyrolysis 공정과 BASF 공정이 대표적이다. BP Chemical Pyrolysis 공정은 Hamburg 대학교에서 개발된 공정을 발전시킨 것으로서 Hamburg 공정이라고도 한다. 이 공정은 유동층 반응기에서 혼합페플라스틱을 약 500°C로 열분해 반응이 일어나도록 하여 Paraffin Wax 상의 오일을 생산한다. 독일 Grangemouth 지역에 Pilot Plant를 건설하여 운영하고 있는 것으로 보고되고 있다. BASF 공정은 CSTR형 플라스틱 용융조(300~350°C)와 관형 열분해 반응기(400~450°C)로 구성되는 열분해 공정과 생성오일의 증류 공정으로 구성되어 있으며, 열분해 오일을 증류하여 납사, α -Clefin, Aromatics 및 증질유를 생산한다. 1만 8,000톤/년 규모의 플랜트를 건설하고, 포장재기물의 페플라스틱을 수집 및 가공하여 공급하는 Duales System Deutschland (DSD)로부터 원료를 공급받아 처리한 바 있고, 경제성을 감안한 최소 규모인 15만 톤/년 규모의 상용플랜트를 건설할 계획이었으나 DSD로부터 페플라스틱 원료를 공급받는 것이 불가능하여 본 사업을 중단한 것으로 알려졌다. 또한 1990년대 초반에 Veba Oel GmbH가 4만 톤/년 규모의 수소 첨가 유화 설비를 건설하였으나 1999년에 경제성 문제로 가동을 중단한 것으로 보고되었다.

지자체와 대기업들이 기술개발과 상용화를 주도했던 일본은 전처리 공정에 크게 비중을 둔 대규모 플랜트를 개발했으며, 이와는 별도로 중소기업에서 소규모 플랜트의 개발도 추진해왔다. 또한 제도적인 면에서도 포장 및 용기류의 분리수집 및 「재활용촉진법」(Law for Promotion of Sorted Collection and Recycling of Containers and Packaging, 1995)을 제정하고, 플라스틱 포장 및 용기에 대해 2000년 4월부터 동 법을 시행

하여 PET를 제외한 모든 페플라스틱을 연료유 혹은 화학공업 원료로 재활용하도록 유도하였었다.

일본에서는 후지리사이클(주), 일본이화학연구소, (주)구보다, 히다찌조선(주), (주)도시바, 치요다화학건설(주) 등의 회사들이 기술개발과 실용화 보급 면에서 가장 대표적이다. 가동방식(연속식, 반연속식, 회분식), PVC의 동시처리 여부, 촉매의 사용 여부, 열분해 반응기의 형식 및 단수 등에 따라 매우 다양한 유화공정들이 개발되었다. 일본에서는 1990년대 후반에 들어 포장·용기류 플라스틱을 대상으로 한 실증 및 상용플랜트의 보급이 본격적으로 추진되어 6,000~1만 2,000톤/년의 규모의 열분해 유화플랜트 10여기가 건설되어 가동된 바 있다.

Table 7은 일본의 대표적인 열분해 유화 상용플랜트들을 정리한 것으로서 2005년을 기준으로 일본에서 가동 중인 상용 규모의 유화 설비는 북해도의 삿바로 플랜트와 니가타현의 니가타 플랜트이다. 이들은 「용기포장리사이클법」에 대응한 대형의 페플라스틱 유화 설비로서 모두 페플라스틱 원료 중에 포함되어 있는 PVC나 PET도 열분해 공정에 투입하여 처리하고 있는 것이 특징이다.¹⁴⁻¹⁷⁾

일본의 열분해 유화기술은 다른 나라들에 비하여 많은 투자를 통해 상용화에 있어 가장 앞섰지만 코크스로 원료나 고로 원료 등과 같은 다른 화학적재활용기술에 비해 원료의 확보 측면에서 경쟁력이 떨어져 플랜트 가동에 어려움을 겪고 있는 것으로 알려져 있다.

일본 플라스틱처리촉진협회가 지난 2007년 12월 발표한 「플라스틱제품 생산·폐기·재자원화·처리처분 현황」자료에 따르면, 일본의 플라스틱 소비량은 약 1,120만 톤이었으며, 페플라스틱 총 배출량은 1,005만 톤으로 5년 전인 2001년에 비해 10만 톤이 줄어든 것으로 나타났다.

최근 기업의 폐기물 무배출(Zero Emission) 노력 등이 강화되면서 산업페플라스틱 배출량은 매년 감소 경

Table 7. The representative commercial plant in Japan¹⁴⁻¹⁷⁾

소재지	사업자	기술개발	규모(톤/년)	개 요
후카이도/ 삿바로시	삿바로플라스틱리사이클(주)	(주)도시바	12,000 (20t/dx2기)	<ul style="list-style-type: none"> • 2000년 4월부터 가동 개시 • PVC 함유 혼합페플라스틱 • 전처리 공정에서 Pellet 생산
후카이도/ 미가사시	도오유화센터	(주)구보다	6,000	<ul style="list-style-type: none"> • 2000년 4월부터 가동 개시 • PVC 함유 혼합페플라스틱 • 전처리 공정에서 Pellet 생산 • 촉매(ZSM-5) 공정
니가타현/ 니가타시	니가타플라스틱유화센터	치요다화학건설(주)	6,000	<ul style="list-style-type: none"> • 1999년 5월부터 상업운전 개시 • PVC 함유 혼합페플라스틱 • 전처리 공정과 촉매 미사용

향을 보이고 있지만, 아직 해결되지 않거나 향후 문제가 될 것으로 예상되는 새로운 개별 플라스틱 제품에 대응한 기술개발이 추진되고 있다. 또한 가전, OA 기기, 자동차분야의 분리·분별기술 고도화로 수평 리사이클이나 리사이클 원료의 복합화 등에 의한 새로운 용도로의 이용이 제안되고 있다.

6. 페플라스틱 유회기술 전망

국내에서 페플라스틱 열분해 유회 기술이 등장한 것은 1990년대 중반이다. 그 후로 수많은 기업들이 기술 개발과 보급에 전력을 투구했지만 현재까지도 이렇다 할 실적을 내지 못하고 있다. 여기에는 복합적인 이유가 있겠지만 가장 큰 원인은 열분해기술을 누구나 해볼 만한 쉬운 기술로 여겼기 때문이라 본다. 즉, 열분해 자원인 페플라스틱의 성상, 수요자가 원하는 제품의 규격 및 국내 여건에 부합되는 기술에 대한 이해가 부족했던 것이다.

페플라스틱의 열분해 유회 기술은 반응기의 종류, 운전방식, 촉매의 사용여부, 반응조건 등에 따라 여러 형태로 다양하지만 기술의 기본원리와 성능은 대등소이다. 단지, 원료의 상태와 운전방식에 따라 기술의 수준이 평가된다. 열분해에서 가장 중요한 첫째 요소는 좋은 원료의 확보다. 그러나 좋은 원료는 대부분 물질재활용으로 소비된다. 따라서 이물질이 많이 포함된 페플라스틱으로부터 좋은 원료를 뽑아내는 전처리 기술이 매우 중요하다. 둘째, 열분해 반응기의 효율적인 가열방식이다. 열분해에 적절한 성분으로 된 원료의 확보는 좋은 제품 품질과 높은 생산성을 보장한다. 열분해 반응기 가열방식에 의해 플랜트 규모의 확장성이 결정되고, 반응기의 걸림돌인 코킹현상의 방지가 가능하다. 셋째, 공정의 운전성, 열효율, 생산성, 안전성, 환경성 및 경제성 등이 확보되어야 하며, 이를 위해서는 일정 규모 이상의 연속 공정이 필수적이다.

2010년도 국내의 페플라스틱 예산 발생량은 약 570만 톤으로 추정한다. 재활용되는 양의 증가를 감안하더라도 재활용을 고려한 철저한 분리배출과 수집처리 제도가 정착된다면 열분해 유회로 재활용이 가능한 양은 200~250만 톤에 달할 것으로 보며, 제품수율을 60%로 하더라도 연간 130만톤(9백만 배럴) 이상 되는 양질의 오일 생산돼 원유수입을 대체할 수 있다.

페플라스틱의 열분해에 의한 기름생산 기술도 신재생 에너지기술의 하나이다. 열분해 기술도 이제 몇몇 기업

체에서 소규모로 가동이 되고 있고, 국가 연구개발 사업에 의한 공적개발도 완료되어 기술보급의 기반이 구축되었다고 판단된다. 풍력발전, 태양광발전, 수소연료전지 등의 기술에는 엄청난 기술개발 예산이 지원되고 있다. 더욱이 풍력발전과 태양광발전 사업에는 발전차액지원제도까지 두고 지원하고 있다. 이미 초고유가 시대를 맞고 있고, 향후의 원유가격 변화를 예측하기 어려운 상황에서 현실적이고 비용효과적인 정책이 무엇인지, 좀 더 균형 있는 신재생에너지 지원 정책이 주어진다면 페플라스틱 열분해유회 기술의 발전은 매우 밝다고 전망된다.

참고문헌

1. 통계자료, 2007: 2006 플라스틱 품목별 생산 및 출하, 지식경제부.
2. 통계자료, 2007: 2006 전구폐기물 발생 및 처리현황, 환경부.
3. 최창식 외, 2003: 중장기 대체에너지 기술개발 및 보급 기본계획 수립 방안, 산업자원부 연구보고서, p. 370.
4. 신대현 외, 2002: 페플라스틱의 화학적 재활용과 열분해 유회기술, 고분자 과학과 기술, 13(3) pp. 322-330.
5. 신대현 외, 2008: 고분자 폐기물의 연속식 열분해 유회 실용화 기술 개발, 한국에너지기술연구원 연구보고서 3A-1-1, p. 21.
6. 신대현 외, 2003: 고분자 폐기물로부터 고급 연료유 생산 공정 실용화, 한국에너지기술연구원 보고서 A-A-1-1, p. 29.
7. 신대현 외, 2006: 고분자 폐기물의 연속식 열분해 유회 기술개발, 교육과학기술부/환경부 연구보고서 2A-A-1-1, PP. 45-58.
8. 신대현 외, 2000: 폐기물 대체에너지 기술개발·보급 3개년 계획, 폐기물연구회 기획 보고서.
9. 에너지관리공단 홈페이지 과제정보, 2008: 2000년 이후 협약과제 및 1999년 이전 협약과제 목록, 에너지관리공단.
10. 제4회 재활용위크샵 논문집, 2003: 자원재활용기술개발사업단.
11. 제3회 재활용위크샵 논문집, 2002: 자원재활용기술개발사업단.
12. 신대현 외, 2006: 고분자 폐기물의 연속식 열분해 유회 기술개발, 교육과학기술부/환경부 연구보고서 2A-A-1-1, PP. 59-91.
13. 신대현, 2002: 폐기물 에너지화 기술 - 열분해 기술, 에너지관리공단 폐기물 연구회, pp. 93-115.
14. 신대현 외, 2008: 고분자 폐기물의 연속식 열분해 유회 실용화 기술 개발, 한국에너지기술연구원 연구보고서 3A-1-1, p. 44.
15. 신대현, 2002: 폐기물 에너지화 기술 - 열분해 기술, 에너지관리공단 폐기물 연구회, pp. 93-115.

16. 橋 秀昭, 2003: *화학적 재활용의 동향과 미래 전망-페플라스틱의 유회기술을 중심으로-*, 플라스틱스エジ 입시증간호.

17. 사단법인 플라스틱處理 新潟促進協會, 2000: *プラスチック油化センターの現状*.



申 大 鉉

- 1975 고려대학교 화공과 학사
- 1980 고려대학교 화공과 석사
- 1987 충남대학교 화공과 박사
- 1988 - 1989 Univ. of Wyoming, Post-doc
- 현재 한국에너지기술연구원
- 2005. 1. - 2007. 5. 한국에너지기술연구원 선임연구부장



盧 南 善

- 1983 연세대학교 화공과 학사
- 1985 한국과학기술원 화공과 석사
- 1996 한국과학기술원 화공과 박사
- 2001 - 2002 University of Utah, Post-doc
- 현재 한국에너지기술연구원 폐기물에너지연구센터 책임연구원



金 性 洙

- 1981 서강대학교 화공과 학사
- 1988 Texas Tech Univ. 화공과 석사
- 1993 Univ. of Pittsburgh 화공과 박사
- 1993 - 1994 Univ. of Pittsburgh, Post-doc
- 현재 한국에너지기술연구원 폐기물에너지연구센터 센터장/책임연구원



金 廣 鎬

- 1995 대전산업대학교 기계설계학과 학사
- 2002 한밭대학교 환경공학과 석사
- 현재 한국에너지기술연구원



全 相 九

- 1996 연세대학교 화공과 학사
- 1998 연세대학교 화공과 석사
- 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원