

폐플라스틱의 처리 · 재자원화 최신동향

신희덕 · 김종현

한국과학기술정보연구원 Reseat 프로그램, *한국과학기술정보연구원

Review of Recycling of the Plastic Waste

Hee-Duck Shin and Jong Heon Kim

Korea Institute of Science and Technology Information Reseat Program

**Korea Institute of Science and Technology Information*

요 약

최근 대규모로 발생하는 플라스틱 폐기물은 사회적, 환경적 처리비용의 증가를 야기하고 있으며, 아울러 폐플라스틱의 재활용과 재이용을 위한 혁신적인 기술개발에 많은 관심을 집중시키고 있다. 플라스틱고형폐기물(PSW)의 처리방법은 재이용(1차), 물질 재활용(2차), 화학적 재활용(3차) 그리고 열에너지회수(4차)의 4단계로 분류 될 수 있다. 본 연구에서는 PSW의 처리 및 재자원화를 위한 다양한 분리, 선별 및 재활용 기술들에 대해 조사·분석하고, 현지점에서 경제적이고 친환경적인 PSW 처리 방안에 대해 제언하고자 하였다.

주제어 : 플라스틱고형폐기물, 해중합, PVC, 열분해, 매립, 가스화

Abstracts

Large scale generation of plastic waste has generated considerable interest it seeking innovative solutions to waste recycling and reuse. Plastic solid waste(PSW) treatment and recycling processes could be allocated to four major categories, re-extrusion(primary), mechanical recycling(secondary), chemical recycling(tertiary) and energy recovery(quatarnary). This review considers the various aspects of the PSW recycling such as recycling methods of PSW, special problems about some proposed process, separation techniques, and recycling of mixed PSW.

Key words : Plastic solid waste, Polyvinyl chloride, Depolymerization, Pyrolysis, Landfill, Gasification

1. 서 론

플라스틱은 풍화에 강하고 가벼우며, 다양한 색상으로

착색이 가능하고 성형가공도 매우 용이하다. 또한 전기 절연성이 좋고 내산성과 내 알칼리성 등 내 부식성 기능도 있어서 다양한 분야에서 다양한 용도로 활용되고 있다).

· Received : December 26, 2013 · 1st Revised : February 12, 2014 · 2nd Revised : April 22, 2014

· 3rd Revised : June 23, 2014 · Accepted : July 9, 2014

*Corresponding Author : Hee-Duck Shin (E-mail : hdshin5742@reseat.re.kr)

Research Fellow Department, Korea Institute of Science and Technology Information, 66, Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 130-741, Korea

Tel : +82-2-3299-6231 / Fax : +82-2-3299-6234

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

전 세계의 플라스틱 생산은 1950년 이후 거의 연간 10%의 증가율을 보이고 있으며, 플라스틱의 1인당 소비량도 북미와 유럽의 경우 1989년에 100 kg/y에서 2010년에는 130 kg/y로 증가하였다.¹⁾ 그러나 플라스틱 소비의 급증세는 폐플라스틱 발생량의 증가로 이어졌다. 플라스틱 중 열가소성수지는 단일종류로 분류될 경우 재활용이 쉽게 이루어 질 수 있으나, 열경화성수지는 재활용 자체가 어려운 경우가 많다.²⁾ 종류별로 분류되지 않은 혼합 폐플라스틱이나 열경화성수지는 일반적으로 매립 혹은 단순 소각으로 처리되고 있으나, 환경문제 및 자원고갈문제로 인해 최근에는 발전용 에너지원으로 이용(thermal recycle) 하거나 물질로써 재활용(material recycle)하거나 화학적으로 재활용(chemical recycle)하는 기술에 대해서도 활발한 연구가 진행 중이다.

국내에서는 2003년 1월부터 생산자책임재활용제도(EPR)가 시행되면서 대상품목인 용기·포장재를 중심으로 활성화 되었고, 최근에는 다수의 연구자들을 통해 다양한 성상의 폐플라스틱 유효활용을 위한 연구가 진행되고 있다.

플라스틱에 관련한 연구는 전 세계적으로 활발하게 전개되고 있는 것으로 조사되었다. 그 중에서 상위 12개국의 논문발표를 보면 미국이 선두를 차지하고 그 뒤를 중국, 일본, 스페인, 브라질이 뒤를 쫓고 있는 형국이다. 우리나라는 12위로 미국의 1/5수준에 머물러있어 플라스틱의 이용과 그 폐자원의 재활용에 매진해야 할 것이다.

2. 플라스틱의 관련법령과 폐플라스틱 관리

2.1. 플라스틱의 소비구조

최근 통계¹⁰⁾에 의하면, 세계적으로 사용된 플라스틱의 양은 지난 60년간 지속적으로 증가된 것으로 나타났다. 전 세계 플라스틱의 생산과 소비는 1950년에 150만 톤에서 2007년에는 2억 4,500만 톤으로 증가되어 연평균 10%의 증가를 보였다. 이러한 증가요인은 인구의 증가도 요인이 되지만, 자동차, 건설 그리고 포장공업에서 플라스틱이용이 증가되었기 때문이다. 그러나 플라스틱산업은 경제위기로 타격을 받아 전 세계적으로는 2009년도에 2억 3,000만 톤으로 감소되었고, 유럽에서는 2008년에 5,500만 톤을 생산하여 전년 대비 8% 감소를 나타냈다.

Plastic Europe에 발표된 바에 의하면 EU의 2011년도 플라스틱 부문별소비는 포장용으로 전 소비량의

39.4%, 건설에 20.5%, 전기·전자 5.4%, 자동차 8.3%, 기타 26.4%를 차지하고 있다. 특히 가볍고 유연성이 좋으며, 그리고 처리가 용이하여 유리대용으로서의 활용이 증가하고 있다.³⁾

2.2. 폐플라스틱의 관리 관련 법령

혼합 폐플라스틱의 처리 및 재활용은 성분상의 복잡성, 고분자 구성요소의 변질, 각종 유·무기·생물학적 잔류물 및 이에 따른 오염 등으로 인해 다양한 문제점을 안고 있다. 처리방법 중 하나인 고온소각은 유해배기가스를 배출하게 되고, 혼소는 지역별로 다양한 규정에 의해 제한되고 있다.

유럽의 폐기물 정책은 세계적으로 영향을 미치는 EU 지령과 EU약속 등에 따른 폐기물처리계층(Waste Hierarchy) 등의 일반원리에 근거하여 전체적인 폐기물 회수율 등의 목표를 설정하고 있다. 각국 정부는 이 지침들을 시행할 의무가 있는데, 이는 결과적으로는 소비자, 소매업자 그리고 생산자의 이행수준에 의해 좌우되게 된다.

유럽 법령에서 또 다른 중요한 지침은 개정된 EU 폐기물 프레임워크 지침(Waste Framework Directive)이다. 이에 관련하여 EU 회원국들은 2010년 12월 12일까지 해당지침을 만족시키는 국내법을 도입해야 했는데, 다음의 세 가지 주요 기능이 포함되어 있다. ①폐기물 억제와 관리정책을 위한 폐기물 계층구조가 적용되어야 하며, ② 2015년까지 종이, 플라스틱 그리고 유리(가정용, 산업용)의 분리수거체계가 구축되어야 하며, ③ 2020년까지 가정폐기물의 재활용율 목표치인 50% 달성해야 한다.³⁾

3. 플라스틱의 재활용 방법

자원 재활용의 일반적인 목적은 유한한 자원의 최종 소비를 최소화하는 것인데, 전 세계 오일 생산량의 4~8%를 사용하는 플라스틱 소재의 경우 이러한 재활용이 꼭 필요한 자원이다.

플라스틱의 재활용 방법은 대체로 물질 재활용, 화학적 재활용, 열적 재활용 등으로 구분된다. 물질의 재활용은 플라스틱의 화학구조를 유지한 상태에서 분리 및 정제 과정을 통해 원래의 플라스틱으로 재생하는 기술이다. 반면, 화학적 재활용은 플라스틱의 화학구조 자체를 변화시켜 원료로써 재생하는 방법이다. 열적 재활용은 일반적으로 열에너지 회수인데, 폐플라스틱을 친환경적인 공정을

통해 효율적으로 열에너지로 변화시키는 기술이다.

과거 다양한 문헌을 통해 폐플라스틱으로부터의 물질 회수와 관련된 연구결과들이 발표되었다. 그러나 대부분의 기술들은 공정에 따라 다르기는 하나 일반적으로 염소의 함유량이 높기 때문에 일부 재활용 기술을 사용할 경우에는 다양한 환경문제를 야기하기도 하였다. 매립 및 퇴비화기술의 경우에도 플라스틱 내의 산화성분 해와 관련된 미확인 위험물질로 인해 환경적으로 안전하지 않은 것으로 알려졌다. 일반적인 소각과 열분해 기술 역시 다량의 염화수소 및 유독성 물질을 발생시키기 때문에 상용화에 많은 제약이 있다. 환경적으로 가장 적합성이 높은 기술은 물질 재활용 및 화학적 재활용 기술인데, 물질 재활용 기술은 폐플라스틱이 종류별로 양호하게 분리되었을 경우에 매우 탁월한 효율성을 보여 주나, 복잡한 혼합 폐플라스틱의 분리 및 선별 기술 자체가 장애물물로 작용하고 있다.

Fig. 1은 브라질의 리우데자네이루에서 이용되고 있는 폐플라스틱의 처리공정을 보여 주고 있다. 그림에 제시된 바와 같이, 수집하여 선별, 압축, 분쇄에 이어 세정과 건조공정을 거치고 재처리 과정을 거쳐 최종 산물로 생산된다.

Table 1은 플라스틱 폐기물의 주요처리방법별 장단점을 비교한 것이다. 전세계적으로 가장 많이 이용되는 매립과 소각은 처리코스트가 적게 드나 환경부하가 큰 단

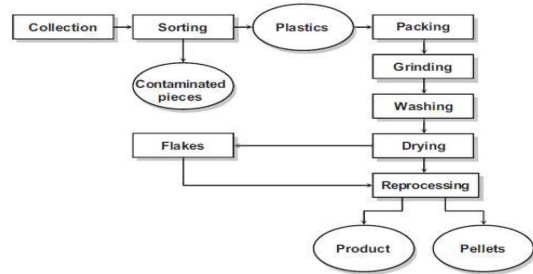


Fig. 1. The stages of plastic recycling by E.B.A.V. Pacheco et al.⁴⁾

점이 있으며, 반면에 활용률이 높지 않은 물질 재활용 및 화학적 재활용 방법은 환경부하는 작으나 처리비용이 많이 드는 단점이 있다.

3.1. 폐플라스틱의 분리 · 선별기술

플라스틱의 재활용은 일반적으로 혼합 고체폐기물 내에 존재하는 다양한 플라스틱을 단일 종류의 플라스틱으로 각각 선별할 수 있는 고효율 분리 · 선별 기술을 필요로 한다. 단일 종류 혹은 단일 성분으로 분리된 폐플라스틱은 이후 2차 활용이 매우 용이하여 폐플라스틱 재활용을 촉진하고, 관련제품의 가치를 상승시킬 수 있다. 특히 산업적으로 볼 때 균질한 특성의 폐플라스틱 원료를 지속적으로 생산하여 제공할 수 있는 능력은 성

Table 1. The comparison of different approaches for disposing of PVC wastes⁵⁾

Method of Disposing	Sensitivity to impurities	Degree of pollution generation	Costs	Recycled product(s)	Properties of the recycled material	Number of plants in operation around the world	Accepting by countries (during the recent decadem especially for developed countries)
Landfilling	Non-sensitive	Very high	Low-cost	No material recycled	-	Large	Non-acceptable
Incineration	Usually non-sensitive	Very high	Usually low-cost	Energy	Usually energetically not efficient	Large	Non-acceptable
Mechanical recycling	Highly sensitive	Low	Middle-cost	PVC	It is dependent on feed material and processing variables of recycling	Fair	Highly acceptable
Chemical recycling	Relatively sensitive	Usually low	Usually high-cost	Diverse raw materials	It is dependent on feed material and processing variables of recycling	Small	Low acceptable

Table 2. Application of mineral processing technique to plastic separation

Property		Separation technique	Feed sizes of plastics(mm)
Gravity	Dry	Air separation	-8+2
	Wet	Sink and float	-8+2
Cyclone		-1.5	
Centrifugal sink and float		-1.5	
Jig		-50+0.5	
Electrostatic property	Dry	Electrostatic separation	-8+2
Wetability	Wet	Flotation	-10+2
Shape, colour	Dry	Hand picking	+20
Grindability	Dry, wet	Selective comminution	Several size+several

공적인 재활용 산업화의 매우 중요한 요건이다. 그러나 폐플라스틱의 단일 성분으로의 분리는 실제로 매우 어려운 기술이며, 대부분의 분리 산물에 PVC를 포함한 다양한 오염 성분이 다량, 혹은 소량 함유되기 때문에 물질 재활용을 위한 재처리가 매우 어려운 실정이다. 일부 업체를 통해 플라스틱을 종류별로 선별할 수 있는 고효율 자동 선별기술이 이용되기도 하나 경제적인 이유로 활용도가 낮다. 결국 현재의 폐플라스틱 재활용 원료들은 원재료와는 비교할 수 없이 낮은 원료특성으로 인해 그 활용 가치도 매우 낮은 제품으로 적용되는 실정이다.

한편, 플라스틱의 분리·선별에 이용되는 기술들은 Table 2에 제시된 바와 같이 대부분 광석을 처리할 때 활용되는 광물처리 기술들이다. 이 기술들은 생산된 광석 중에서 유용한 광물들을 분리하고 회수하여 제련 및 정련공정에 공급 가능한 수준의 품위까지 높이기 위해 발전된 기술들이다.

3.2. 물질 재활용⁶⁾

폐플라스틱의 물질로서의 재활용은 앞서 설명한 분리·선별 공정을 통해 생산된 종류별 폐플라스틱을 원료로 분쇄, 용융, 세정, 선별, 혼합 등의 단순한 기계적 처리 공정을 거쳐 재생품으로 제조하는 것으로, 단일 종류 혹은 성분의 이물질 혼입이 적은 폐플라스틱을 대량을 확보할 수 있을 때 적용 가능한 기술이다. 그러나 역시 제조과정 중 변질과 열화가 동반되기 때문에 대부분의 경우 저 품질 제품으로 단계적 재활용(Cascade recycle)을 하게 된다.

물질 재활용으로 가장 많이 이용되는 폐플라스틱은 발포 폴리스티렌(EPS)이다. 발포 폴리스티렌은 회수 중 이물질 혼입이 적기 때문에 단일 성분으로 회수할 수

있어서 적극적인 재활용이 이루어지고 있다. 또한 농업용 PVC시트 역시 예전부터 재활용이 이루어 졌는데, 대부분 세정 및 분쇄공정을 거쳐 매트 혹은 타일로써 재생산된다.

한편으로, 폐플라스틱을 물질재활용에 의해서 적정용도의 원료화하기 위한 선별·분리기술의 개발도 활발하게 이루어지고 있다. 특히 토사, 유리, 금속, 음식물, 목재, 이중플라스틱 등의 다양한 이물질이 혼입된 일반폐기물에서 목적인 플라스틱을 효율적으로 선별·분리하기 위해서는 각종 요소기술을 병용 혹은 조합할 필요가 있다.

3.3. 화학적 재활용

최근의 폐플라스틱의 화학적 재활용공정은 다양한 혼합 폐플라스틱을 처리할 수 있다. 화학적 재활용은 종류별 고도분리 작업이 불필요하고 오염된 폐기물에 대해서도 크게 민감하지 않으며, 소비 에너지 측면에서도 물질 재활용 공정보다 유리하다. 특히 최근에는 적층필름, PCB 등 서로 치밀하게 접촉되어 단일 종류로의 분리·선별이 거의 불가능한 다중재료의 사용이 증가하고 있는 추세로, 물질 재활용 기술보다 화학적 재활용 기술의 중요성이 높아지고 있는 실정이다.

일반적인 화학적 재활용 방법은 열분해 및 화학반응 공정으로 이루어져 있다. 이미 폴리에틸렌(PE), 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 등 범용플라스틱을 대상으로 한 열분해 플랜트가 다수 가동되고 있으며, 열분해 반응 혹은 열분해 반응과 촉매를 이용한 화학반응을 조합하여 플라스틱의 80% 이상을 유화 제품으로 회수하고 있다. 다만 투입원료에 따라 분해반응시간이 긴 경우도 있고, 연료 혹은 화학원료로 이용하기 위한 재처리 공정을 필요로 하기도 한다. 또한 개

량, 개질, 분해촉매 등에 대한 연구가 이루어지고는 있으나, 열분해 시 부식성 가스가 발생하는 폐플라스틱이나 난분해성 페놀수지 등의 재활용에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.⁵⁾

3.3.1. 폐플라스틱의 고로 환원제이용

제철소에서 철을 생산하기 위해서는 고로에 철광석과 함께 탄소성분의 코크스를 투입해야 한다. 코크스는 로 내에서 열을 발생시키면서 철광석의 주성분인 산화철로부터 산소를 빼앗은 환원제로 작용한다. 플라스틱은 일반적으로 석유나 천연가스로부터 생산되며 주성분은 탄화수소, 즉, 탄소와 수소이다. 따라서 포함된 불연성분 및 금속 등의 이물질 제거하고 미립자로 분쇄한 후 압밀하여 플레이크(flake)화하는 등의 적절한 처리 공정을 거치면 폐플라스틱을 코크스와 유사한 환원제로 사용할 수 있다. PVC가 포함된 폐플라스틱은 로 내에서 염화수소가 발생하여 로가 손상될 수 있으므로 무산소 상태에서 약 350°C로 열처리하여 염화수소를 제거한 후 코크스와 함께 고로에 사용하게 된다.

3.3.2. 폐플라스틱의 유화

플라스틱은 석유가 원료이므로 제조공정의 역 공정을 통해 다시 석유와 유사한 물질로 변환할 수 있다. 이러한 기술을 유화기술이라고 하는데, 1970년대 후반부터 개발이 추진되어 현재는 거의 상용화 단계에 있다. 그러나 고분자 상태의 플라스틱을 저분자 상태로 되돌리는 프로세스는 에너지공급이 필요한 흡열반응으로, 일반적으로 400°C까지 가열해야 하기 때문에 추가적인 에너지 소모가 요구되고, 또한 유화된 산물을 제품화하기 위해서는 별도의 분리·정제공정을 거쳐야 하므로 이와 관련된 추가 설비도 필요하다. 또 유화공정에는 항상 발화 및 폭발위험이 공존하므로 안전을 위한 대책도 요구된다.

3.3.3. 폐플라스틱의 코크스로에의 재활용

앞서 언급한 바와 같이 제철소에서 철을 생산하기 위해서는 철광석과 함께 코크스를 고로에 넣어야 한다. 코크스는 주로 석탄을 스팀으로 처리하여 제조하는데, 이때 부산물로 석탄 휘발성분으로부터 탄화수소 오일과 코크스로 가스가 생성된다. 플라스틱 역시 같은 방식을 적용하면 생성되는 비율은 다르지만 같은 산물을 얻을 수 있다. 생성된 코크스는 제철원료로 활용하고, 탄화수소 오일은 화학원료로, 코크스로 가스는 발전용 연료로

활용이 가능하다.

일본의 신일철주금(주)에서는 폐플라스틱을 코크스, 화학원료 및 연료로 이용하기 위한 기술개발을 완료하고 나고야 등의 5개 제철소에서 가동 중이다. 생산되는 산물의 비율은 코크스 20%, 탄화수소오일 40%, 코크스로 가스 40% 수준이다. 이러한 산물을 생산하기 위해서는 다음과 같은 과정을 거친다. 우선 지자체에서 수거한 폐플라스틱을 파쇄한 후 철 등의 이물질 제거하고, 100°C로 가열하여 입자상태로 가공한다. 이것을 파쇄·정립 화 한 석탄에 1~2% 범위에서 혼합하여 코크스로 탄화실에 공급한다.

탄화실 내부는 무 산소상태이며 폐플라스틱은 1,200°C까지 건류승온하여 열분해된다. 이때 분해된 고온가스는 석탄 고온가스와 함께 냉각·정제되어 상온에서 열량이 높은 가스와 오일로 분리되며, 나머지 고체 성분은 코크스로 산출된다.

3.3.4. 가스화^{9),7)}

폐플라스틱의 가스화는 석탄의 가스화와 유사한 기술로써, 가스화를 통해 화학제품의 출발원료인 수소와 일산화탄소를 주성분으로 하는 합성가스를 제조하는 기술이다. 생산된 합성가스는 모노머 합성 등에 재이용된다. 이 기술은 현재 일본의 재활용업체인 EBU에서 연간 30,000톤 규모로 상업 가동하고 있다. 또한 폐가전 및 자동차 부품 등에 사용되는 취소계 난연제가 배합된 플라스틱을 용융로 플랜트를 이용하여 다이옥신의 발생 없이 열분해함으로써 전력을 생산함과 동시에 화학원료도 생산하는 기술도 개발되어 있다.

3.3.5. 모노머·원료화(화학분해법)

폐플라스틱 중 단일소재로 잘 회수되는 것으로는 PET와 PS가 있다. 이러한 플라스틱들은 재생 플라스틱의 원료로 직접 사용이 가능하다. 이렇게 직접 원료로 활용하는 기술을 모노머·원료화라 한다. 특히 회수된 페PET는 물질 재활용을 중심으로 섬유제품, 식품 이외 용도의 병 및 포장용 시트 등에 거의 100% 재사용되고 있다. 물론 다시 원래의 용도로 재사용하는 이른바 “bottle-to- bottle”재활용은 아직까지 시행되고 있지 않다.

3.4. 열적 재활용⁸⁾

플라스틱을 함유한 폐기물은 소각 시 에너지회수가 가능한데, RDE, RPF 등의 폐플라스틱의 발전연료화 기술에 대한 연구는 과거부터 지속적으로 이루어져 왔

며, 풍력, 태양광, 바이오매스 등과 함께 재생에너지의 한 분야로써 인식되어 왔다.

앞서 서술한 바와 같이 폐플라스틱의 열적 재활용은 이물질 혼입으로 인한 선별·세정공정과 모노머(해중합화) 제조 공정 등에 비해서 비용이 비교적 적게 드는 것으로 알려져 있다. 다만 플라스틱 자체의 높은 발열량에 대한 회수율이 상대적으로 낮고, 소각 시 발생하는 이산화탄소 및 유해가스 등의 처리 문제, 그리고 고형연료화 및 슬러리화 기술 등의 수준이 여전히 낮아 상용화의 걸림돌로 작용하였다. 그러나 최근에는 내식성 소재 기술의 발전으로 인해 고발열량 소각이 가능하도록 제조할 수 있게 됨으로써 설비적인 문제는 상당부분 해결되었다.

폐플라스틱 내에 PVC가 함유되어 있으면 앞서 언급한 바와 같이 소각 시 염화수소가 발생하여 소각로를 손상시키기 때문에, 사전에 염화수소를 분리한 후 연료로 활용하며, 분리된 염화수소는 염산으로 회수하여 제철소 열원 공정의 산세척 작업 등에 재사용된다.

4. 논문검색을 통한 폐플라스틱 재활용 관련 국내의 연구개발 동향 분석

4.1. 관련 논문의 기본검색 결과

본 연구에서는 Web of Science(Thomson Reuters) 데이터베이스를 기초로 관련 논문을 검색하고 이를 통해 폐플라스틱의 재활용과 관련된 국내의 연구개발 동향을 분석하고자 하였다. 연구에 사용된 논문 DB검색식은 다음과 같다.

Title=
 ((Plastic* or Polyethylen* or "Polypropylene* chloride" or Polypropylene* or polycarbonate* or pet or hdpe or hdpe or pvc or ldpe or pp or ps or abs) and (Recycle* or reus* or resourc*))
 Timespan = 2000-2011, Database =
 SCI-EXPANDED Lemmatization=On

검색기간은 2000년부터 2011년까지의 12년간으로 제한하였으며, 이때 검색된 논문은 총 1,061편이었다. 연도별로 발표된 논문 수는 2006년까지는 횡보를 걷는 현상을 보이다가 2007년에 증가 한 후 다시 비슷한 수준을 유지하였으며, 2010년에 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 해당기간 동안 논문발표수의 증가율은 기간별

Table 3. Number of papers published from different countries

순위	국가	논문 수	비중 (%)
1	USA	150	14.14
2	China	75	7.07
3	Japan	74	6.97
4	Spain	71	6.69
5	Brazil	70	6.6
6	UK	54	5.09
7	France	52	4.9
7	India	52	4.9
9	Germany	49	4.62
10	Italy	44	4.15
12	South Korea	33	3.11

논문 수 기준으로 5.68%, 누적 논문 수 기준으로는 27.55%로 분석되었다.

4.2. 국가별 논문 발표 수 추이

폐플라스틱의 재활용과 관련된 논문을 다수 발표한 상위 12개 국가의 논문발표 수를 Table 3에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이, 미국이 큰 차이로 수위를 차지하고 있으며, 그 뒤를 중국과 일본, 스페인과 브라질이 비슷한 수준에서 뒤따르고 있다. 우리나라는 1위 미국의 1/5 수준으로 12위에 머무르고 있다. 미국은 최근 재활용 사업이 번창하여 사업체수가 거의 3배 증가하는 등 1,800개 이상의 업체가 폐플라스틱 재활용 사업에 관여하고 있다. 특히 사용 후 플라스틱 병은 재활용량이 1990년 이후 매년 증가하여 2009년에는 13만 5천 톤에 달해, 미국 내에서 가장 재활용량이 많은 플라스틱이 되었다.

미국의 폐플라스틱 재활용 관련 연구논문 발표 수는 2000년 이후 등락을 계속하였으나 2010년 이후 다시 급증하였다. 이는 2009년 이후 플라스틱 병을 중심으로 플라스틱 재활용 정책을 적극적으로 펼친 결과로 분석된다. 중국은 인구증가와 경제 성장 면에서 플라스틱 소비와 재활용의 잠재력이 매우 클 것으로 전망된다. Fig. 2에 나타난 바와 같이, 중국은 2006년 이전에는 플라스틱 연구가 저조하였으나, 2006년 이후 급상승한 것으로 나타나 향후 추이가 주목된다.

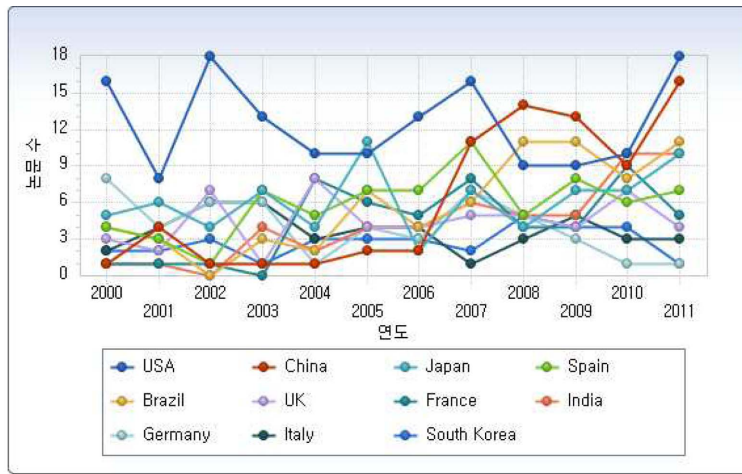


Fig. 2. Number of papers published by major countries.

4.3. 국가별 논문 수준 분석

발표 논문의 수를 통해서 국가별 관련 연구의 활성도를 예측할 수 있는데, 피인용 횟수를 감안한 논문 수준을 통해서 관련 연구의 질적 수준을 파악할 수 있다. Table 3은 국가별 발표 논문 수와 논문당 피인용 횟수, 그리고 이를 통해 산출한 논문수준지수를 제시한 도표이다. 논문 수준 지수는 논문의 수준을 분석하기 위해 특정분야의 전체 논문의 피인용 횟수에 대한 특정 그룹(이 경우는 국가)이 발표한 논문의 평균 피인용 횟수의 비로써, 피인용 횟수에 기반을 둔 질적 수준 평가 지표이다. 수준 지수가 1.0 이상인 경우 해당 분야 평균 피인용 횟수에 비해 특정 그룹 발표 논문의 피인용 횟수가 높음을 의미하며, 이는 간접적으로 해당 그룹의 전체적인 연구 수준이 높음을 의미한다.

Table 4에서 알 수 있듯이, 발표 논문의 수는 미국이 크게 앞서고 다음으로 중국과 일본이 뒤를 이었으나, 논문의 피인용 횟수로 평가한 논문수준은 영국, 이탈리아, 스페인 앞서 있고, 미국과 독일, 일본이 뒤를 잇고 있어서 논문 수와 다른 경향을 보임을 확인하였다. 논문수준이 평균이상인 국가는 영국, 이탈리아 등 7개국이며, 우리나라는 수준 지수가 약 0.655로 선진국에 비해 낮은 값을 나타냈다.

4.4. 국제 공동연구 네트워크 수준 분석

Fig. 3은 폐플라스틱의 재활용 관련 분야의 각 국가별 공동연구 현황을 분석한 결과이다. Table 5에 제시된 국제협력관계지수는 “특정연구수행 주체(기관 혹은 국가)

Table 4. Number of papers published from different countries

국가	논문 수	논문 당 피인용 수	수준 지수
UK	54	18.778	2.059
Italy	44	16.273	1.784
Spain	71	14.62	1.603
USA	150	12.333	1.352
Germany	49	10.306	1.13
China	75	10	1.097
Japan	74	9.392	1.03
France	52	8.154	0.894
India	52	7.231	0.793
Brazil	70	6.014	0.659
South Korea	33	5.97	0.655

의 협력 대상 중 외국 소재 연구수행 주체의 비중”을 의미하며 국제협력강도는 “분야 평균 국제협력관계지수에 대한 특정 연구수행주체의 국제협력관계지수의 비”로써 특정연구수행주체의 국제협력관계지수를 분야별 평균으로 정규화한 수치이다. 표를 살펴보면, 미국이 자국을 제외한 19개 국가와 공동연구를 수행하여 가장 넓은 국제네트워크를 구축하고 있는 것으로 나타났다. 우리나라의 경우는 5개 국가와 공동연구를 수행하였으며 주요 국제공동연구 대상 국가로는 미국, 일본, 캐나다 등이 있었다.

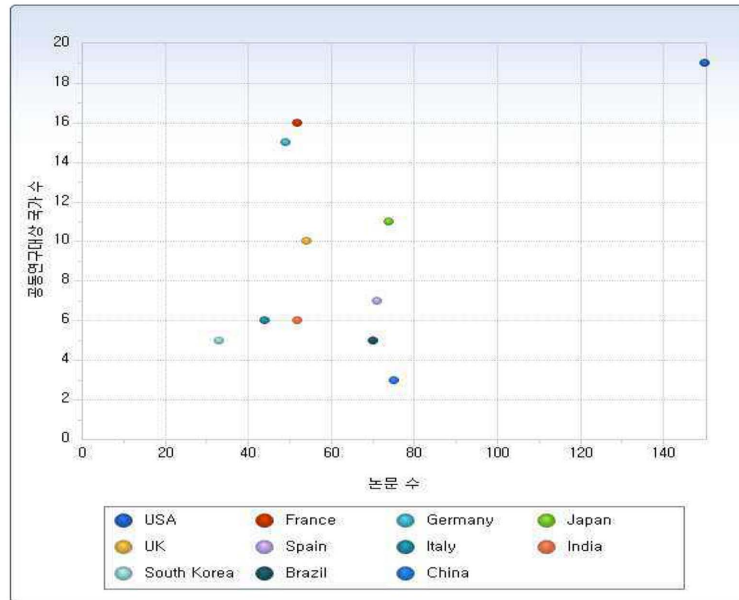


Fig. 3. Collaboration with other countries on the plastics.

Table 5. Number of the papers applied from different institution

기관	논문 수	국제협력관계지수	국제협력강도
Natl Tech Univ Athens	12	0.833	5.594
Univ Estadual Campinas	13	0.308	2.068
Univ Politecn Valencia	16	0.188	1.262
Royal Inst Technol	12	0.167	1.121
Univ Sains Malaysia	24	0.167	1.121
Univ Fed Sao Carlos	14	0.143	0.96
E China Univ Sci & Technol	9	0.111	0.745
Univ Tokyo	9	0.111	0.745
Univ Palermo	10	0.1	0.672
Chinese Acad Sci	14	0.071	0.477
Indian Inst Technol	10	0	0

4.5. 기관별 논문 발표 현황

플라스틱의 재활용에 관한 논문의 저자와 소속기관을 분석한 결과 920개의 기관에서 관련연구가 진행되는 것으로 파악되어, 이 분야가 전 세계적인 연구 테마로 자리 잡고 있음을 알 수 있다. 파악된 기관 중 가장 많은 논문을 발표한 기관은 Universita Sains Malaysia로 24편의 논문을 발표하여 전체 1061편의 논문 중

2.26%를 점유하였다. 그 뒤로는 Universitat Politecnica de Valencia가 16편(1.51%), Chinese Academy of Science가 14편(1.32%)의 논문을 발표하여 각각 2, 3위를 차지하고 있다. 각 기관의 연도별 발표건수를 살펴보면 계속적으로 등락하는 경향을 보이고 있어서, 각 기관이 관련연구를 단기과제가 아닌 2년 이상의 중기 혹은 장기과제로 추진하고 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

폐플라스틱은 유리나 금속과 같이 단일 소재로 이루어져 있지 않고, PE, PP, PET, EPS, PSP 그리고 PVC 같은 다양한 종류의 플라스틱이 혼합되어 있는 폐기물이다. 이러한 각각의 플라스틱은 특성이 유사한 경우도 많아서 금속이나 무기질 재료(광물)의 분리·선별에 일반적으로 이용되는 비중선별, 자력선별 등의 기술을 적용하기가 어려워 대부분 매립되거나 부분적으로 열분해 혹은 유화 기술에 의존한 재활용이 이루어졌다. 그러나 세계적으로 환경보전과 자원고갈, 보유자원의 유효 활용에 대한 요구가 많아지면서 폐플라스틱에 대해서도 고도선별 및 효율적 활용을 위한 기술의 개발 필요성이 높아지고 있다. 미국의 경우, 2008년을 기준으로 폐플라스틱의 6.5%가 재활용되고, 7.7%가 열분해되었으며, 나머지 85.8%는 매립처분되었다. 매립처분 플라스틱을 비 재생플라스틱(NRP)으로 간주하면 이를 에너지로 전환하였을 경우 석탄 3,670만 톤이나 석유 1억 3,900만 배럴, 혹은 천연가스 약 222억 kL에 해당되는 에너지를 대체할 수 있을 것으로 보고되었다.

NRP를 유용한 자원으로 활용하기 위해서는 다양한 재활용 기술 개발 및 용도 개발이 필수적이다. 열분해 및 소각을 통한 원료 회수 및 열에너지 회수 시에는 공정 중 발생하는 염화수소, 다이옥신 및 중금속 오염물질 등의 발생을 억제하고 처리할 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 폐플라스틱의 물질 재활용을 위해서는 친환경적이고 경제적인 플라스틱 고도선별기술이 필요하다. 폐플라스틱에는 재활용에 악영향을 미치는 다양한 오염물질이 존재하고, 플라스틱 사이에도 재활용 방법 및 용도가 상호 호환되지 않는 경우가 대부분이기 때문이다.

우리나라는 플라스틱 생산량에서 2005년도 기준으로 세계 5위로 플라스틱 다량 생산 국가이며, 이 중 60% 이상이 내수용으로 소모되고 있다. 2006년 자료를 보면

국내 발생 폐플라스틱의 약 60% 정도가 재활용되고 있는 것으로 나타나는데, 대부분의 양이 열에너지 회수에 집중되어 있어서 진정한 의미의 재활용 활성화는 이루어지지 않은 것으로 평가된다.

후 기

본 총설은 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 「심층정보기술동향분석」 보고서를 기초로 하여 작성된 것으로 KISTI의 지원에 감사드립니다.

References

1. Murata Tokuji, 2004: The waste plastic Including Various Problems which Vinyl Chloride, Additive, Environmental Hormone etc. *Monthly The Waste*, 21-30
2. www.plasticseurope.org Publications
3. Anke BREMS, Jan BAEYENS and Raf DEWIL, 2012: RECYCLING AND RECOVERY OF POST-CONSUMER PLASTIC SOLID WASTE IN A EUROPEAN CONTEXT, 16(3), 669-685
4. Elen B.A.V. Pacheco, Luiza M. Ronchetti and Eric Masanet, 2012: An overview of plastic recycling in Rio de Janeiro, *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 140-146
5. Mehdi Sadat-Shojai, Gholam-Reza Bakhshandeh, 2011 : Recycling of PVC wastes, *Polymer Degradation and Stability*, 96, 404-415
6. Yasuo Takeo, 1997: *Engineering Materials*, 45(1), p.80
7. Yasuo Takeo, 1997: *Engineering Materials*, 45(1), p.84
8. Yasuo Takeo, 1997: *Engineering Materials*, 45(1), p.82
9. S.M. Al-Salem, P. Lettieri, J. Baeyens, 2009: Recycling and recovery routes of plastic solid waste(PSW); A review, *Waste Management*, 29, 2625-2643
10. Association of plastics Manufacture, *Plastics-The Facts* 2013, *PlasticsEurope*, p.10



신 희 덕

- 산업기술정보원 연구위원
- 현재 한국과학기술정보연구원 ReSEAT 프로그램 전문연구위원
- 당 학회지 제12권 4호 참조



김 종 현

- 현재 한국과학기술정보연구원 선임 연구원