

페플라스틱 리사이클링의 현주소 및 향후 방향

§조영주 · 조봉규

유용자원재활용기술개발사업단

Status and Future Prospects for Plastics Recycling

§Young Ju Cho and Bong-Gyoo Cho

R&D Center for Valuable Recycling

요 약

페플라스틱 리사이클링이 사회적 이슈로 부각하여 그 중요성이 날로 더해지고 있는 이때에 우리나라 페플라스틱의 리사이클링 현황 및 향후 나아갈 방향에 대하여 고찰하였다. 페플라스틱 리사이클링은 비단 우리나라뿐만 아니라 전 세계 주요 경제적, 사회적 문제로 부각되어 환경을 보호하고 다음 세대에 지속가능한 지구를 물려주는데 중요 요소로 다뤄지고 있다. 특히 그동안 전 세계 발생하는 플라스틱 폐기물의 상당량을 처리해 오던 중국이 플라스틱 폐기물의 수입을 중단함에 따라 각국은 자국 내에서 페플라스틱을 리사이클링 해야만 하는 문제에 직면하게 되었다. 우리나라도 자원순환법에 의해 페플라스틱의 매립 및 소각이 더욱 어려워지고 있어 페플라스틱을 효과적으로 리사이클링 하여 다시 사용하는 것은 매우 중요한 과제이다.

주제어 : 페플라스틱, 환경, 리사이클링, 폐기물, 합성수지

Abstract

Recently, plastic recycling has emerged as a social issue, and its importance is increasing. Therefore, this article reviewed the current status and the future directions of domestic plastic recycling. Plastic recycling is major economic and social problems not only in South Korea but also worldwide and is being treated as an important factor for protecting the environment and for sustainability in the next generation. In particular, China, which has been dealing with a large amount of plastic waste generated around the world, has banned importing plastic waste, therefore, other countries have faced the problem of recycling plastics in their countries. In South Korea, the landfill and incineration of the waste are becoming more difficult by the Framework Act on Resources Circulation, therefore, the recycling and reuse of plastics are a very important.

Key words : Waste Plastics, Environment, Recycling, Waste, Synthetic Resin

1. 서 론

지구 환경의 위기시대에 살고 있다. 자원의 가채 기원이 점점 줄어들어 지하자원을 확보하기 위한 각국의 자원

전쟁이 심화되고 있으며, 물 부족이 심화되어 지표면의 사막화가 늘어나고 있다. 온실가스와 미세먼지는 국경의 구분이 없이 글로벌 관점에서 문제가 인식되고 있으며 자국의 이익을 위해 환경을 보호하는 정책이 더욱 강화되고

· Received : June 30, 2020 · Revised : July 24, 2020 · Accepted : July 31, 2020

§ Corresponding Author : Young Ju Cho (E-mail : jabez3@kigam.re.kr)

R&D Planning Department, R&D Center for Valuable Recycling, 124, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

©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.

있는 추세이다.

특히 마구 버려지는 쓰레기는 지구 오염의 주범 중 하나로 모든 국가가 골치를 앓고 있다. 이제까지 전세계 쓰레기의 상당량을 처리하던 중국이 쓰레기 반입을 금지함에 따라 모든 나라는 자국 안에서 쓰레기를 처리해야만 하는 문제에 당면하게 되었다. 중국은 2018년부터 폐플라스틱, 폐지, 폐섬유 등 고체 쓰레기 24종에 대한 수입을 전면 금지했는데 중국이 그간 수입해오던 한 해 쓰레기 양은 730만 톤 가량으로(2016년 기준) 전 세계 재활용 쓰레기의 절반을 넘는 양이었다¹⁾.

또한 버려지는 플라스틱은 자연에서 잘게 부서져 미세플라스틱(5mm 미만)으로 바다와 강으로 유입된다. 미세플라스틱은 어류나 조류의 먹이가 되어 생태계를 교란시키며 결국은 우리 삶의 질을 저하시키는 원인으로 되 돌아온다. 버려지는 플라스틱 외에도 처음부터 미세플라스틱으로 제조되는 치약, 세정제, 섬유유연제 등도 있지만 2010년도 자료에 의하면 대략 480~1,200만 톤 이상의 플라스틱이 해양으로 유입되고 있는데 주로 PE, PP, 나일론 등이 포함되어 있다²⁾. 정부는 미세플라스틱 문제를 해결하기 위한 연구개발을 준비 중에 있는데 플라스틱 순환구조를 바꾸기 위한 대체 물질 및 소재를 개발하고, 미세플라스틱의 환경오염을 정확히 인지하기 위한 측정 및 모니터링 기술을 개발하며, 미세플라스틱의 정확한 위해성을 평가하고, 환경유입을 원천적으로 막기 위한 저감기술을 개발할 예정이다³⁾.

우리나라의 경우도 폐플라스틱의 처리문제가 사회적 이슈로 떠오르고 있다. 정부는 2018년 자원순환기본법을 통해 재사용, 재활용을 극대화 하고 매립 및 소각을 지양하도록 정책을 펼치고 있다. 2018년 수립된 환경부 자원순환 기본계획은 환경 정책의 방향을 감량→재사용→재활용→에너지재활용→안전처리 등의 우선순위를 두어 폐기물 발생 이후의 사후적인 처리 대신 제품 생산 단계부터 재활용까지 전 과정에서 자원순환성 개선이 되도록 정책을 추진하고 있다⁴⁾. 매립 및 소각 비용은 지속적으로 증가함에 따라 적법한 절차를 통해 폐기물을 처리하지 않고 불법적으로 방치한 폐기물이 전국에 120만 3천 톤 이상 있는 것으로 보도되고 있다⁵⁾. 폐기물 중에서도 플라스틱은 매립 시 분해되는 기간이 수십 년에서 수백 년이 소요되며, 소각 시 2차적으로 대기오염이나 유해가스를 배출하는 등의 문제를 갖고 있어 폐플라스틱을 순환 활용하는 것은 매우 중요한 일이다.

2. 폐플라스틱 현황 및 리사이클링

2.1. 플라스틱(합성수지) 통계 현황

2019년 국내에서 생산되고 수입된 주요 합성수지의 수급현황은 아래 Table 1과 같다⁶⁾. Table 1에서 보는 바와 같이 국내에서 2019년에 생산된 주요 합성수지는 1,450만 톤이며 이중 국내에서 570만 톤을 사용하고 870만 톤은 해외로 수출하고 있다. 2018년 우리나라 에틸렌 생산능력을 보면 9,255,000톤/년으로 전세계 생산량의 5.2%

Table 1. Annual production of synthetic resin in 2019⁶⁾ (unit: ton/y)

Synthetic resin	Production	Supply			Stock	Import	Domestic consumption
		Domestic	Export	Subtotal			
LDPE	668,406	222,893	412,870	635,763	48,970	159,804	382,699
L-LDPE	1,532,944	872,355	689,119	1,561,474	114,302	128,760	1,001,115
EVA	723,955	101,956	634,986	736,942	45,283	6,784	108,739
HDPE	2,146,529	785,329	1,288,452	2,073,781	127,375	143,315	928,644
PP	4,416,533	1,471,159	2,952,195	4,423,354	241,787	35,680	1,506,837
PS	584,017	151,671	435,406	587,077	19,251	19,920	171,591
EPS	385,489	301,624	87,195	388,819	20,430	35,151	336,775
ABS	1,952,140	580,690	1,359,621	1,940,311	60,764	11,075	591,764
PVC	1,418,776	914,183	499,680	1,413,863	59,489	111,187	1,025,369
PC	672,862	326,456	339,264	665,720	26,227	45,268	371,725
Total	14,501,651	5,728,316	8,698,788	14,427,104	763,878	696,944	6,425,258

Table 2. Annual population growth rate in 2018⁸⁾ (unit: person, %)

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Total population	51,141,463	51,327,916	51,529,338	51,696,216	51,778,544	51,826,059
Growth rate	0.38%	0.36%	0.39%	0.32%	0.16%	0.09%

Table 3. Annual treatment methods of waste in 2018⁹⁾ (unit: ton/day, %)

Year	2013		2014		2015		2016		2017		2018	
	Amount	%	Amount	%	Amount	%	Amount	%	Amount	%	Amount	%
Total	393,116	100	401,658	100	418,214	100	429,128	100	429,531	100	446,102	100
Landfill	37,974	9.7	37,906	9.4	37,801	9.0	37,942	8.8	35,524	8.3	34,648	7.8
Incineration	25,041	6.4	24,523	6.1	26,084	6.2	26,450	6.2	26,290	6.1	26,404	5.9
Recycling	326,910	83.2	336,815	83.9	352,824	84.4	363,800	84.8	366,650	85.4	384,237	86.1
Sea Discharge	2,608	0.7	1,423	0.4	661	0.2	92	0.0	48	0.0	42	0.0
Others ^{주1)}	583	0.1	991	0.2	844	0.2	844	0.2	1,019	0.2	771	0.2

를 차지하는데 에틸렌은 플라스틱을 생산하는 석유화학 산업의 기본이 되는 화학물질로 합성수지, 합성섬유 및 합성고무 등 다양한 화학제품의 중간재를 생산하는데 사용된다. 흔히 에틸렌 생산능력으로 각 국가의 석유화학 산업 규모를 나타내는 척도로 사용하기도 한다⁶⁾.

2.2. 폐기물의 분류 및 발생 현황

폐기물은 크게 사업장폐기물과 생활폐기물로 구분 된다⁷⁾. 사업장 폐기물은 사업장 일반폐기물과 건설폐기물, 지정폐기물로 나뉘지며 사업장 일반폐기물에는 사업장에서 배출하는 생활계폐기물과 시설계폐기물로 다시 구분된다. 이밖에 보건·의료기관 동물병원, 시험·검사기관 등에서 배출되는 폐기물 중 인체에 감염 등 위해를 줄 우려가 있는 의료폐기물은 사업장폐기물 중 지정폐기물에 포함되어 있다. 플라스틱은 이모든 폐기물에 포함되어 발생되고 있다.

2018년 기준으로 우리나라 폐기물 발생현황을 보면 연간 약 1억 6천 3백만 톤이 발생되고 있는데 이는 10톤 트럭으로 1,600만대 정도이며 40ft(26.8톤) 수출용 컨테이너로 담아 대략 서울시(605.2km²) 300배 넓이에 쌓아 올린 양이다.

폐기물 발생현황을 보면 2013년 이후 급격한 증가를 보이지 않고 매년 5% 이내로 증가하는 추이를 보이고 있다. 이는 인구증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 보이는데 Table 2에서 보는 바와 같이 2013년부터 2018년까지의 인구증가가 거의 정체된 것과 밀접한 관계가 있는 것으로 추론 된다⁸⁾.

2018년도 하루 동안 발생한 폐기물을 세분하여 처리방법을 살펴보면 Table 3과 같이 하루 총 발생량 446,102톤에서 매립으로 34,648톤, 소각으로 26,404톤, 리사이클링으로 384,237톤(86.1%)을 처리하고 있다. 통계상 리사이클링이 86% 이상으로 되어 있지만 아직도 약 13% 정도의 폐기물이 매립 및 소각으로 처리되고 있으며 86%로 집계된 리사이클링이 얼마나 실효성 있는 실질적인 방법으로 처리되는지 확인하기가 어려운 실정이다⁹⁾.

이중 2018년도 생활계 폐기물만 별도로 구분하여 보면 Table 4와 같이 발생량 56,035톤 중에서 매립은 7,525톤/일(13.4%), 소각은 13,763톤/일(24.6%), 리사이클링은 34,747톤/일(62%)로 전년대비 소각률은 0.3%p, 매립률은 전년대비 0.1%p 아주 미미하게 감소하는 추세를 보이고 있다.

2018년 기준 발생 폐기물 중 플라스틱 관련 폐기물의 배출 현황을 보면 아래 Table 5와 같다. Table 4에서 보는 바와 같이 1일 생활계 폐기물 발생량은 56,035.4톤이며 이중에 플라스틱 관련 폐기물량은 8,848.2톤/일로 15.8%를 차지한다. 사업장 배출시설계폐기물은 Table 6과 같이

주1) 지정폐기물 ‘기타’로, 기타=(기타 처리량+최종보관량)-전년도 이월량을 나타내며, ‘기타 처리량’은 폐기물관리법 시행령 별표 3의 폐기물 처리시설의 종류 내 중간처분시설 중 기계적(압축, 파쇄 등), 화학적(고형화, 중화, 응집 등), 생물학적(호기성, 혐기성 등) 처분시설 등을 나타냄.

Table 4. Plastic of waste from the households(households+workplace) in 2018⁹⁾ (unit: ton/day. %)

Amount generated & processing	Total amount	Subtotal of plastics (%)	Volume-rate garbage disposal system	Separated put out for recycling			
			Plastics	Vinyl (synthetic resins)	Plastics	Expanded resins	
Amount	56,035.4	8,848.2 (15.8%)	4,884.4	2315	1490.7	158.1	
Processing	Landfill	7,525.4	934.1 (12.4%)	934.1	0	0	0
	Incineration	13,762.9	2,896.0 (21.0%)	2,896	0	0	0
	Recycling	34,747.1	5,018.1 (14.4%)	1,054.3	2315	1490.7	158.1

Table 5. Plastics amount wastes from the households in 2018⁹⁾ (unit: ton/day. %)

Amount generated & processing	Total amount	Subtotal of plastics (%)	Volume-rate garbage disposal system	Separated put out for recycling			
			Plastics	Vinyl (synthetic resins)	Plastics	Expanded resins	
Amount	46,749.3	6,409.8 (13.7%)	3,752.8	1,295.7	1,226.2	135.1	
Processing	Landfill	6,545.2	879.1 (13.4%)	879.1	0.0	0.0	0.0
	Incineration	12,429.3	2,495.3 (20.1%)	2,495.3	0.0	0.0	0.0
	Recycling	27,774.8	3,035.4 (10.9%)	378.4	1,295.7	1,226.2	135.1

Table 6. Plastics amount wastes from the workplace in 2018⁹⁾ (unit: ton/day. %)

Amount generated & processing	Total amount	Subtotal of plastics (%)	Volume-rate garbage disposal system	Separated put out for recycling			
			Plastics	Vinyl (synthetic resins)	Plastics	Expanded resins	
Amount	9,286.1	2,438.4 (26.3%)	1131.6	1019.3	264.5	23	
Processing	Landfill	980.2	55.0 (5.6%)	55	0	0	0
	Incineration	1,333.6	400.7 (30.0%)	400.7	0	0	0
	Recycling	6,972.3	1,982.7 (28.4%)	675.9	1019.3	264.5	23

1일 167,727톤이 발생되는데 이중 폐합성고분자화합물 발생량은 13,616톤/일로 8.1%이다. 건설폐기물 발생량은 206,951톤/일인데 이중 가연성 폐합성수지, 폐섬유, 폐벽지는 1,848톤/일로 1% 미만이다. 전체적으로 1일 폐기물 발생량은 445,102톤이며 이중 플라스틱 관련 폐기물은 24,311톤/일로 5.4%이다.

아래 Table 7 통계 자료는 『자원순환기본법 제13조(자원순환 통계조사) 및 동법 시행령 제30조(업무의 위탁)』, 『폐기물관리법 제25조 제1항(폐기물처리업), 폐기물관리법 제46조 제1항(폐기물처리 신고)』, 『폐기물관리법 시행규칙 제60조 제1항(보고서의 제출)』 법적근거에 따라 『폐

기물관리법 제25조 제3항의 규정에 의한 폐기물처리업 허가를 득한 자』와 『폐기물관리법 제46조 제1항의 규정에 의한 폐기물처리 신고를 한 자』가 지방자치단체 및 지방환경청에 신고한 내용을 한국환경공단에서 집계한 자료이다. 대상업체는 '18년도 폐기물재활용실적을 '19년도 2월말까지 해당기관에 폐기물관리법 시행규칙 별지 제52호 서식(폐기물 재활용 실적보고)을 제출 또는 공단 올바로시스템(www.allbaro.or.kr)을 통해 제출한 사항으로 지자체 담당자가 업체 실적을 내검 및 확정된 통계값이다. 이중 플라스틱 관련 통계자료는 아래 Table 7와 같다. Table 7에 의하면 플라스틱 관련 폐기물의 리사이클링

Table 7. Recycling of synthetic polymeric compound in 2018⁹⁾ (unit: ton/year, 1,000 won/year)

Categorize	Classification of recycling wastes (code number)		Number of operators (unit)	Amount of recycling waste (ton/year)	Amount of sales (ton/year)	Total sales (1,000 won/year)
	Total amount		4,859	6,489,021	4,514,039	1,552,834,979
Synthetic polymer compound from workplace general waste	Subtotal		4,679	6,327,339	4,345,469	1,484,082,274
	Waste synthetic resins	51-03-01	3,771	5,799,972	4,022,749	1,247,880,952
	Waste synthetic rubbers	51-03-02	214	166,165	104,915	25,950,308
	Waste polyvinyl chloride resins (pvc)	51-03-03	106	53,753	57,044	34,192,042
	Waste polyurethane form	51-03-04	10	3,870	3,959	568,656
	Waste floating pole for marine aquaculture	51-03-05	5	287	0	0
	Waste expanded synthetic resins	51-03-06	134	14,435	20,940	8,594,144
	Plastic packaging materials	51-03-07	51	11,083	13,468	4,036,262
	Waste fishing net	51-03-08	14	2,270	2,218	449,399
	Others	51-03-99	374	275,503	120,178	162,410,510
Synthetic polymer compound from specified waste	Subtotal		113	50,460	69,101	37,879,415
	Waste polyethylene (pe)	01-01-01	31	9,291	8,407	8,575,514
	Waste polypropylene (pp)	01-01-02	13	7,481	8,497	7,645,307
	Waste polyvinyl chloride resins (pvc)	01-01-03	11	13,017	12,440	7,651,327
	Waste polyethylene terephthalate (pet)	01-01-04	8	0	19,801	100,000
	Waste polyurethane	01-01-06	1	62	104	395,201
	Waste polystyrene (ps)	01-01-08	5	3,049	3,054	3,275,489
	Waste acrylonitrile butadiene styrene (abs resins)	01-01-09	2	532	532	833,451
	Others	01-01-99	42	17,027	16,266	9,403,127
Waste from households	Waste synthetic resins	91-06-01 91-06-02	67	111,222	99,469	30,873,290

가동업체는 4,859개이며 연간 리사이클링 양은 649만 톤이다.

Table 6에서 연간 플라스틱관련 발생량은 887만 톤 (24,311.3톤/일)이고 매립으로 37만 톤, 소각으로 250만 톤, 리사이클링으로 600만 톤을 처리한다고 하였으나 Table 7에 의하면 리사이클링이 649만 톤으로 나오는데 이는 전년도 누적된 폐기물을 합하여 처리한 결과이다. 리사이클링 되는 649만 톤 중 판매되는 양은 451만 톤 (1.55조 원)으로 평균 34만원/톤으로 판매되고 있다.

3. 페플라스틱 리사이클링 기술

3.1. 페플라스틱 리사이클링 기술

페플라스틱을 리사이클링 하는 방법은 Fig. 1에서 보는

바와 같이 크게 세 가지로 구분할 수 있는데 화학적 리사이클링(Cheical recycling)과 물리적 리사이클링(Material recycling) 및 열적 리사이클링(Pyrolysis recycling)으로 나눌 수 있다. 페플라스틱의 자원화를 위해서는 발생된 페플라스틱을 종류별로 분리 선별하는 것이 매우 중요하다. 종류별로 선별된 페플라스틱은 물리적 분쇄 및 고형화(Pelletizing)를 통해 리사이클링 제품으로 생산되어 소재로 순환 활용할 수 있다. 이물질이 다량 함유된 페플라스틱의 경우 물리적으로 리사이클링하기 어렵거나, 고부가 제품으로 리사이클링 될 수 없기 때문에 화학적 리사이클링으로 화학원료 물질을 회수하여 원료로 순환활용할 수 있다. 물리적 리사이클링이나 화학적 리사이클링이 어려운 경우 열적 리사이클링으로 에너지원으로 활용하게

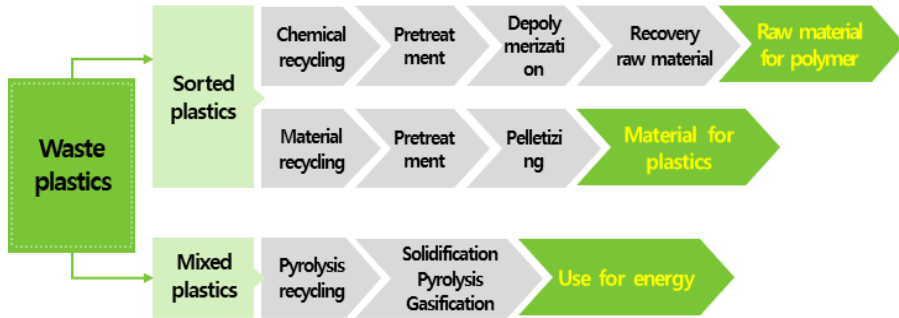


Fig. 1. Recycling technology schematic diagram for waste plastics¹⁰⁾.



Fig. 2. BASF Chemical recycling of plastics waste¹¹⁾.

나 열분해로 유화화 및 가스화를 통해 리사이클링 할 수 있다. 경제적으로 가장 좋은 리사이클링은 재질별 분리선별이 제대로 이뤄진 경우 물리적으로 리사이클링 하는 것이다. 그러나 재질별로 잘 선별된 폐플라스틱도 경우에 따라 물리적 리사이클링이 안 되며 화학적 리사이클링이 더 유효한 경우도 있다.

물리적 리사이클링의 대표적인 예는 생수병으로 사용되는 PET(polyethylene terephthalate)병의 리사이클링으로서 수거된 PET병을 작은 조각으로 분쇄하여 흙이나 이물질을 제거하고 세척하여 flake를 만든 후 PET flake로 섬유용 원사, 재생 fiber, PET sheet 등에 원료로 다시 사용하는 것이다. 그러나 이 경우에도 PET에 착색이 되어 있으면 물리적 리사이클링이 안 되며 이 경우 화학적 리사이클링으로 원료화 하는 기술이 필요하다.

열적 리사이클링의 대표적인 기술은 열유화 기술이다. 플라스틱의 세계적 기업 중 하나인 BASF에서는 Fig. 2에

서 보는 바와 같이 폐플라스틱에 열화학적 공정을 통해 합성가스 및 오일과 같은 원료를 추출하여 제품 생산에 필요한 화학원료를 대체하는 공정을 개발하여 가동 중이다. 이 리사이클링 공정을 켐사이클링(chem-cycling)이라 명하고 여기서 생산된 원료로 식품포장재 등을 생산하고 있다.

3.2. 폐플라스틱 리사이클링 R&D 현황

국가과학기술지식정보서비스(NTIS, National Science & Technology Information Service)의 2000년부터 2019년 자료에 의하면 플라스틱 리사이클링이 키워드로 된 R&D추진 실적이 총 354건, 932억 원으로 검색되었다. 이중 실제로 폐플라스틱에 관련된 R&D만을 선별하여 보면 209건 455억 원으로 조사되었다. 폐플라스틱 대상별로 구분하여 보면 Fig. 3에 나타난 것처럼 168건이 복합배출 폐플라스틱을 대상으로 리사이클링에 대한 연구가 추진되었음을 알 수 있다. 이는 전체 폐플라스틱 연구 209

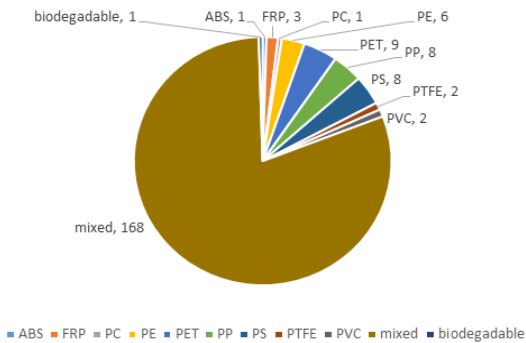


Fig. 3. R&D status of waste plastics by material (2000~2019).

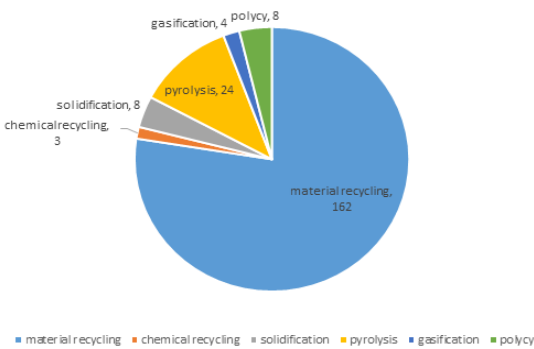


Fig. 4. R&D status of waste plastics by methodology (2000~2019).

건의 80%에 달하여 특히 폐플라스틱 중 처리에 어려움을 겪고 있는 PVC 관련 연구는 단 2건이며 물리적 재활용에 대한 연구가 1건, 열분해로 유화화 하는 연구가 1건 추진되었다¹²⁾.

Fig. 4에서와 같이 폐플라스틱의 리사이클링 기술별 R&D 추진 현황을 보면 물리적 리사이클링이 162건으로 전체 추진 R&D 건수의 77.5%가 물리적 리사이클링에 관한 연구이며 화학적 리사이클링은 3건으로 전체 추진 R&D 건수의 1.4% 밖에 되지 않는다. 2019년 우리나라 R&D 총 예산은 164,728억 원이며¹³⁾ 209건의 플라스틱 관련 R&D 중에서 2019년에 추진된 26건의 R&D 예산은 72.8억 원으로 0.04%에 불과하다. 이는 폐플라스틱의 리사이클링에 관한 연구가 제대로 추진되어지지 않았다는 것을 반증한다.

4. 기술개발 방향

앞서 언급한 바와 같이 정부는 자원순환 정책방향을 “감량▶재사용▶재활용▶에너지재활용▶안전처리” 순서로 우선순위를 명확화 하고 있다. 생산·소비 단계에서 자원의 효율적 이용과 제품의 재사용을 추구하고 에너지 재활용 위주의 양적 팽창에서 벗어나, 고부가가치형 재활용 제품을 생산하는 물질 재활용 중심의 재활용 체계 개선을 정책방향으로 설정하였다. 이제까지 폐기물 발생 이후의 사후적인 처리 대신 향후에는 제품의 생산부터 리사이클링까지 전 과정에 대한 자원순환성 개선을 추진할 예정이다. 이를 위해 자원순환 성과를 측정·평가할 수 있도록 성과관리시스템을 개선하고 원료투입부터 제품, 생산, 폐기물 처리에 이르기까지 전 과정에 대한 물질흐름분석 시스템을 구축하고 실제 리사이클링 된 양을 기준으로 통계를 세분화 해나갈 예정이다. 폐기물 발생 저감을 최우선으로 하고 고품질 물질 재활용을 촉진하며 지역 거버넌스를 통해 지역별 폐기물 처리 최적화를 추진하고자 한다. 이를 통해 폐기물 발생량^{주2)}을 20% 이상 감축(95.5→76.4톤/십억 원)하고 순환이용률을 70.3에서 82.0%로 증가시키며 특히 폐기물처분분담금을 부과·징수하고 폐기물 직매립을 단계적으로 금지하여 최종처분율^{주3)}을 9.1에서 3.0%로 낮추고 에너지회수율^{주4)}을 16.3에서 20.3%로 자원순환지표를 설정하였다¹⁴⁾.

또한 정부는 미세플라스틱 문제를 해결하기 위해 2021년부터 다부처 R&D를 추진할 예정이다. 미세플라스틱이 환경문제로 떠오르는 가운데 미세플라스틱에 의한 피해를 최소화하기 위하여 단기적으로는 폐플라스틱의 효과적 관리를 위해 미세플라스틱의 발생원인 폐플라스틱의 발생을 저감하고 수거 및 리사이클링을 확대할 수 있는 R&D를 추진할 예정이다. 미세플라스틱의 실제 발생량과 인체 및 생태에 미치는 위해성과 영향을 정보화하는 연구를 추진할 예정이다. 중장기적으로는 미세플라스틱의 대체물질과 전주기 안전관리 방안 등 총체적인 대책을 위해 범부처 협의체제를 구축 운영 중에 있으며 과학기술과 사

주2) 원단위 발생량(톤/년·십억 원) 국내 총생산 대비 폐기물 발생량의 비율

주3) 폐기물발생량 중 최종처분량*의 비율(발생 후 바로 매립된 양 및 중간처리를 거쳐 매립된 양의 합)

주4) 가연성폐기물 발생량 중 에너지화된 폐기물의 비율

회정책의 연계 촉진을 위해 온라인 플랫폼을 구축 운영하고 있다. 예상하기로는 미세플라스틱 관련 R&D는 범부처 기획 및 예비타당성 심사를 거쳐 2022년부터 추진될 것으로 예상된다¹⁵⁾.

페플라스틱 리사이클링에 관련된 환경부 R&D 사업현황을 보면 특정 목적형 사업으로 3개 사업이 추진 중인데 그 중 글로벌담환경기술개발사업 중 유용자원재활용기술개발사업이 추진 중이며 저급 PET 폐자원의 리사이클링, PU 폐자원의 리사이클링, 가교 PE 폐자원의 리사이클링 등이 추진되고 있다. 특정 목적형 사업 외에 추진 중인 24개 이슈 해결형 사업 중에는 생활폐기물 재활용 기술개발사업의 페비닐·페플라스틱 분리·선별 분야에서 페비닐 재활용을 위한 파쇄·세척·건조·선별 및 Up-Cycling 시스템 개발, 페플라스틱 재활용을 위한 ICT 기반의 한국형 선별공정 개발을 추진 중이며 페비닐·페플라스틱 물질재활용 분야에서 저급 페플라스틱을 이용한 토목구조물 적용기술개발, 저급 페플라스틱을 이용한 건축자재 제조기술개발, 저급 페플라스틱을 이용한 인공섬유 상용화 기술개발, PE계 페플라스틱을 이용한 재생원료 상용화 기술개발을 추진 중에 있다¹⁶⁾.

4.1. 페플라스틱 수거체계 구축 연구

페플라스틱의 리사이클링을 위해서는 거점별 수거 및 재활용센터의 설치 운영이 필요하다. 플라스틱의 특성상 부피가 커 페플라스틱이 발생 시 장거리 이동은 높은 물류비용을 수반하게 되어 경제성을 확보하기 어렵기 때문에

지역별로 수거된 페플라스틱은 지역 내에서 리사이클링 되는 것이 합리적이다. 원활한 수거체계 구축을 위한 수거시스템 연구, 배출자 중심의 수거 기술 연구 및 IT 융합형 수거관리 연구 등이 필요하다.

정부는 플라스틱 제품 및 포장재 생산자에게 일정량의 재활용 의무를 부여하고 재활용에 필요한 비용을 부담하게 하는 EPR(Extended Producer Responsibility) 제도를 통해 자원순환을 촉진해오고 있다. EPR 제도의 재활용 의무대상 품목은 4개 포장재군(종이팩, 유리병, 금속캔, 합성수지재질 포장)과 5개 제품군(전지류, 타이어, 운할유, 형광등, 양식용부자)이며, 전자제품은 폐자동차와 함께 2008년부터 재활용뿐만 아니라 유해물질 함유까지 제어하는 환경성보장제로 확대 운영되고 있다. 이 중 제품·포장재의 회수·재활용의무를 대행하고 재활용 가능자원의 안정적인 수요 및 공급을 통하여 공공의 이익을 도모하고자 한국순환자원유통지원센터를 운영하고 있다. 한국순환자원유통지원센터에서는 빈용기 보증금제도 및 금속캔, 종이팩, 페트병, 플라스틱 용기/포장재, 유리병, 발포합성수지의 회수·재활용실적관리와 지원금 지급을 운영하고 있다¹⁷⁾.

전기·전자제품의 리사이클링을 예로 보면 정부에서는 전기·전자제품 및 자동차의 재활용 촉진을 위하여 유해물질 사용 억제, 재활용 용이성 제고 및 그 폐기물을 적정하게 재활용하는 등 제품의 설계·생산부터 폐기 시까지의 전 과정을 관리함으로써 자원순환체계 구축 및 환경부하 최소화를 유도하는 제도로 환경성보장제도를 운영하

Area	RC	Capa. (ton/year)	Note
Capital(Yongin)	MERC	35,800	Direct management by cooperative
Capital(Hwaseong)	MWRD	53,300	
Capital(Yangju)	KRC	61,200	
Chungcheong(Asan)	ARC	40,900	
Chungcheong(Geumsan)	Modern E&R	36,000	
Gyeongsangbukdo(Yeongcheon)	YRC	44,800	
Gyeongsangnamdo(Haman)	CRC	36,600	
Honam(Jangseong)	HRC	46,500	
Honam(Nonsan)	HRC(Nonsan Branch)	19,900	
Jeju(Jeju)	JRC	7,200	Direct management by cooperative
Dongbuk(Yeouju)	ENRC	43,800	
Dongnam(Miryang)	ESRC	48,000	

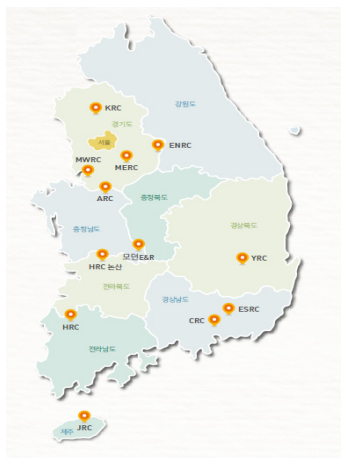


Fig. 5. Recycling center by region¹⁹⁾.

고 있다. 환경정보장제도로 관리되는 사용 후 전기·전자 제품은 약 50여종으로 냉장고, 텔레비전, 세탁기 등 대형 가전과 전기오븐, 전자레인지, 선풍기 등 소형가전을 포함하고 있다. 2023년부터는 태양광 패널도 사후관리부문에 포함될 예정이다⁸⁾.

전기·전자제품의 리사이클링은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 한국전자제품자원순환공제조합에서 회수 및 재활용을 통합 관리하고 있으며 전국적으로 권역별 12개 리사이클링 센터를 운영 중에 있다⁹⁾. 폐플라스틱의 재활용을 위해 가장 먼저 선결되어야 하는 것이 전기·전자 폐제품과 같은 수거체계의 구축이다. 특히 폐플라스틱은 대부분 밀도가 낮아 부피가 커서 장거리 운반 시 물류에 많은 비용이 드는 문제점이 있어 권역별 수거 및 재활용센터 구축이 절실히 필요하다.

폐플라스틱을 위한 권역별 수거 및 리사이클링 센터의 구축과 함께 농어촌 및 오지의 폐플라스틱을 수거를 위한 이동식 수거시스템에 대한 연구도 필요하다. 특히 어촌지역의 폐어구를 수거하고 농촌지역의 비닐을 리사이클링하기 위한 소규모 단위 수거시스템을 개발하여 미회수되는 폐플라스틱을 최대한 줄여야 한다.

4.2. 폐플라스틱 재질별 분리선별 기술 연구

폐플라스틱의 재질별 분리를 위한 연구개발이 필요하다. 이제까지 폐플라스틱은 재질별 수거될 경우에 한해서 물리적 리사이클링을 위주로 추진되어 왔으며 혼합 폐플라스틱의 경우 선별이 어려워 저부가가치의 제품으로 리사이클링 되어 왔다. 혼합 폐플라스틱이나 복합 폐플라스틱에 적합한 분리선별 기술의 고도화를 위한 연구개발을 추진하여 보다 고부가가치의 제품으로 리사이클링이 필요하다.

폐플라스틱 리사이클링의 가장 중요한 핵심기술 중의 하나는 수거와 분리선별이다. 종류별로 모아진 폐플라스틱은 다양한 방법으로 리사이클링이 가능하나 혼합되어 있거나 이물질이 포함된 경우 고부가가치로 리사이클링하기가 어려워진다. 일반적으로 폐플라스틱이 수거되면 가장 손쉽게 Table 8에서 보는 바와 같이 종류별 플라스틱의 비중 차이를 이용해 주로 물(비중 1.0)을 사용해 분리선별하게 된다. 비중선별을 통해 비교적 가벼운 플라스틱인 PE, PP, PS류와 좀 더 무거운 PET, PVC, ABS류로 선별할 수 있다. 이 후 다양한 분리선별 기술로 고순도의

Table 8. Specific gravity of plastics

Plastics	Specific gravity
PP	0.90 ~ 0.92
LDPE	0.91 ~ 0.93
HDPE	0.94 ~ 0.96
PS	1.03 ~ 1.06
PET	1.35 ~ 1.38
PVC	1.32 ~ 1.42

플라스틱으로 분리될 경우 물리적 재활용을 통해 재생 플라스틱으로 리사이클링 할 수 있다.

이 밖에 플라스틱을 선별하는데 유용하게 사용되는 선별기술로 근적외선 선별(NIR, near infra red) 방식이 있다. 컨베이어 벨트 위로 지나가는 플라스틱에 근적외선을 조사하여 그 반사광의 파장을 분석하여 플라스틱의 종류를 식별한 후 컴퓨터 제어를 통해 토출장치로 분리선별하는 방식이다. 그러나 흑색 플라스틱의 경우 근적외선을 조사하여도 반사광이 제대로 나오지 않고 흡수되어 근적외선 선별을 사용할 수 없다. 특히 우리나라 폐자동차 및 폐가전제품에서 나오는 대부분의 플라스틱은 흑색이나 짙은 회색 플라스틱이 많아 근적외선 선별로 구분하기 어려운 실정이다. 이 경우 근적외선 대신 레이저를 사용하는 레이저 선별 방식이 유용하다. Fig. 6은 레이저를 사용한 폐플라스틱 선별기술 공정도를 나타내고 있다²⁰⁾.

Table 8 플라스틱 비중에서 보는 바와 같이 PET와 PVC는 비중이 비슷하여 비중선별로 분리하여 매우 어렵다. 이 경우 Fig. 7과 같은 마찰하전 정전선별을 이용하면 유용하다. 일정 크기의 플라스틱을 서로 충돌시키거나 다른 재질과 충돌시키면 하전 되어 전류가 흐르는 전기장 통과 시 positive(+) 하전 된 입자는 (-)전극으로 negative(-) 하전 된 입자는 (+)전극으로 이동하는 원리를 이용한 선별 방법이다²¹⁾.

폐플라스틱을 분리선별하기 위해서는 비중선별, 정전선별, 레이저선별, 색상선별 등 이미 개발된 다양한 선별 기술들이 사용될 수 있다. 어느 한 기술만으로 폐플라스틱을 완벽히 선별하기는 어려우므로 다양한 선별기술이 복합적으로 적용되어야만 효과적으로 선별이 이뤄질 수 있다. 또한 pilot plant에서 개발된 선별 기술이 상용규모에서 실증되기 위한 연구도 지속적으로 추진되어야 한다.

가전, 자동차 등 복합적인 제품에서 플라스틱이 함께

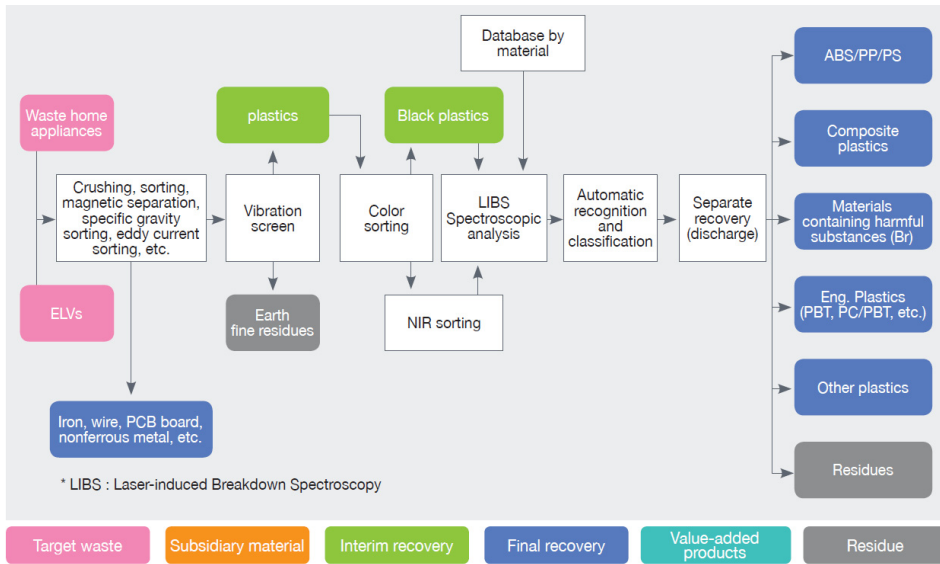


Fig. 6. Process chart for automatic sorting system based on laser²⁰⁾.



Fig. 7. Electrostatic separator for waste plastics by friction electric charge²¹⁾.

배출되는 경우 금속, 세라믹, 플라스틱 등을 함께 리사이클링 할 수 있는 복합시스템화가 필요하다. 이 경우 분리, 파쇄, 선별, 회수, 재자원화 등의 순서와 단위 공정별 기술이 어떻게 조합되어 시스템화 하는 것이 경제적이며 효율적인지 기술적 뒷받침이 있어야 한다. 폐플라스틱의 경우 파쇄 되어 다른 금속이나 이물질이 섞인 경우 분리선별이 어려운 경우가 많아 파쇄 전 가능한 최적의 선별기술을 통해 동일한 재질로 분리하는 것이 매우 중요하다.

4.3. 폐플라스틱 화학적 리사이클링 연구

물리적 리사이클링과 열적 리사이클링에 한정된 기술을 확장하여 화학적 리사이클링의 연구가 필요하다. 혼합 폐플라스틱이나 이물질이 함유된 폐플라스틱의 리사이클링은 화학적으로 원료화 하는 것이 최선의 방법이다. 화학적 리사이클링을 위해서는 플라스틱을 만드는 역방향의 반응이 필요하며 이때 가장 중요한 것은 공정비용이 회수 플라스틱 비용보다 저렴해야 한다는 것이다. 이를 위해 공정의 최적화는 물론 역반응을 도와줄 수 있는 적합한 촉매 등이 개발되어야 한다.

착색된 PET 및 플래카드 등 섬유로 배출된 PET 폐자원은 물리적 리사이클링이 어려워 화학적 리사이클링으로 원료화 할 수 있다.

Fig. 8은 물리적 리사이클링이 어려운 저급 PET을 대상으로 glycolysis 및 methanloysis 반응을 통해 화학적으로 재활용하는 공정을 보여주고 있다. 이때 생성되는 DMT는 다시 플라스틱을 생산하는 원료로 사용할 수 있게 된다²²⁾.

산업용 및 생활용으로 많이 사용되는 PU(poly urethane) 및 PVC의 경우 수거체계가 불확실하고 수거된 폐자원에 이물질이 포함된 경우가 많아 물리적 리사이클링이 어렵다. 특히 PU 및 PVC의 경우 소각 시 유해물질이 발생하거나 소각시설의 부식 등 2차 오염의 피해가 있어 화학적 리사이클링으로 원료화 하는 기술이 필요하다.

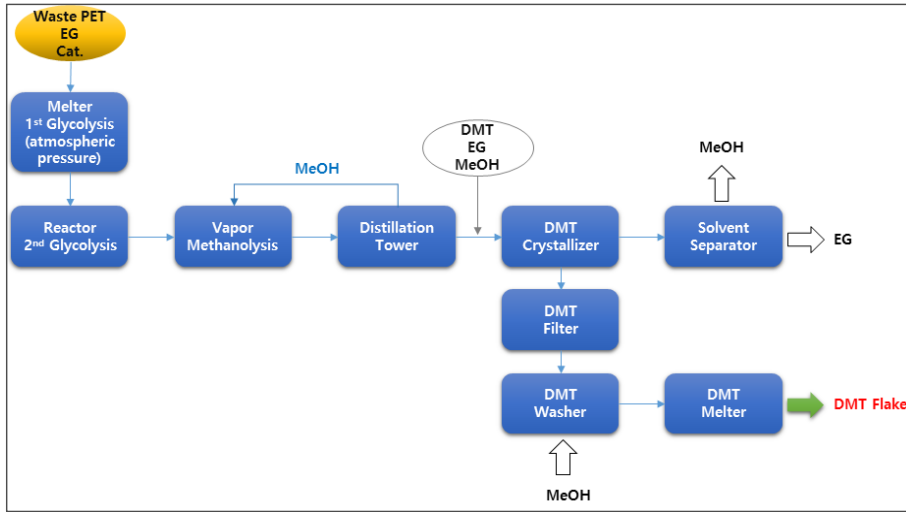


Fig. 8. Process chart for recovery DMT (dimethyl terephthalate) from waste PET²²⁾.

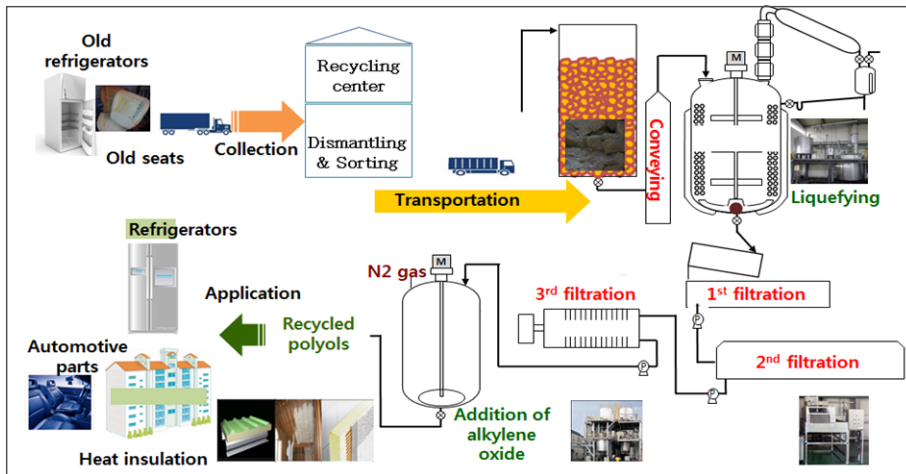


Fig. 9. Process chart for recovery Polyol from old refrigerators PU (polyurethane)²³⁾.

Fig. 9에서와 같이 PU 폐자원으로부터 폴리올을 제조하여 다시 PU로 재사용할 수 있는 화학원료화 기술이 매우 유용하다. 냉장고에서 발생한 PU 폐자원은 전처리 과정을 통해 이물질 제거하고 해중합 액상화 과정을 통해 폴리올로 전환되어 다시 PU 제조의 원료로 사용된다²³⁾.

PU는 냉장고 단열재로 사용될 뿐만 아니라, 차량의 시트폼, 침대 매트리스, 소파, 의자 신발 등 우리 생활 주변에 다양하게 상용되고 있는 플라스틱이지만 리사이클링이 잘 되지 않고 있으며 조각이나 매퍼로 처리하기 어려운 실정이다. PVC의 경우에도 창틀, 벽지, 배관, 바닥재

등 생활 밀접형 플라스틱임에도 불구하고 리사이클링이 어려우며 PVC가 포함된 다른 재질의 플라스틱도 리사이클링이 잘 되지 않고 있다. 연질, 경질 등 다양한 형태를 지닌 PVC도 종류별로 선별된 경우에는 물리적 리사이클링으로 처리할 수 있지만 그렇지 않은 경우는 화학적 리사이클링으로 원료화 하는 방법이 최선이라고 할 수 있다²⁴⁾. Fig. 10은 PVC의 화학적 리사이클링 공정을 보여주고 있다.

Fig. 10에서는 폐PVC를 촉매로 dehydrochlorination 반응을 통해 hydrocarbons과 HCl로 전환하는 공정이다. 생성된 HCl은 EDC와 VCM을 거쳐 다시 PVC로 사용할

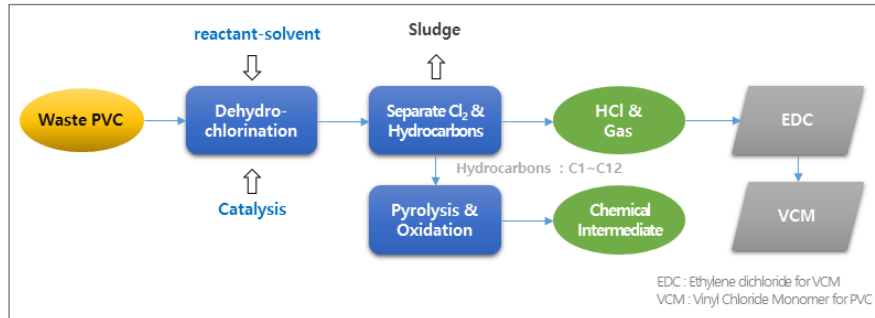


Fig. 10. Process chart of chemical recycling for waste PVC²⁴⁾.

수도 있다.

전 세계적으로 폐플라스틱의 화학적 리사이클링은 상용화 사례가 거의 없을 정도로 연구가 미진한 분야이다. 저급 폐플라스틱의 매립과 소각을 줄이는 궁극의 방법은 화학적 리사이클링 밖에 대안이 없다. 미세플라스틱의 발생을 줄이기 위해서도 화학적 리사이클링으로 원료화 하는 다양한 연구개발이 시도되어야 할 것이다.

4.4. 플라스틱 단일 소재화 기술 개발

플라스틱 제품의 생산 단계에서 재활용이 원활하도록 디자인이 설계되어야 한다. 가능한 단일 재질의 제품을 생산해야 하며, 복합 재질의 경우에도 폐기 후 분리배출이 쉽도록 고려해야만 한다.

플라스틱으로 제품을 만드는 경우에서 단일소재를 사용하여 제품을 만드는 것이 필요하다. 생산자의 입장에서 원가절감이 중요한 경쟁력이지만 결국 리사이클링 안 되는 제품은 시장에서 도태되고 소비자로부터 외면 받게 되어 제품의 지속가능성을 떨어뜨리게 된다. 포장용기류에서도 가능한 단일 재질을 사용하여 제품을 만드는 것이 리사이클링에 유리하다. 복합재질의 경우에도 분리가 쉽도록 디자인 하는 것이 필요하다. 예를 들어 PET병의 경우 뚜껑과 라벨을 분리하기 쉽도록 디자인하여 제품을 출시한다면 리사이클링이 훨씬 원활해질 수 있다. 특히 필름의 경우 식품 포장용 복합필름은 산소투과를 막기 위해 알루미늄을 사용하는 경우가 많은데 이런 다층 필름은 분리하지 않으면 소각으로 처리할 수밖에 없으며 이때에도 알루미늄으로 인해 소각로가 막히는 등 문제를 일으킬 수 있다.

폐플라스틱이 섞여 있을 경우 종류를 알아내기가 쉽지

않다. 그래서 폐플라스틱은 종류별로 분리배출하는 것이 매우 중요하다. 종류별로 분리배출을 위해서는 플라스틱 용기에 정확한 플라스틱 성분이 표기되어야 한다. 또 플라스틱 제품이나 포장재의 제작과정에서도 가능한 분리배출이 쉽도록 고려하여 생산되어야만 한다. 또한 여러 종류의 플라스틱을 혼합하여 사용하거나 종류가 다른 플라스틱이 다층의 구조를 갖고 있는 경우 분리선별 하여 재활용하기는 거의 불가능하다. 따라서 단일 재질로의 제품이나 포장재를 만들어 리사이클링이 가능하도록 노력해야만 한다.

5. 총 합

국내 최근 폐플라스틱 발생현황 및 지난 10년간의 폐플라스틱 리사이클링 관련 R&D 현황에 대해 살펴보았다. 정부의 제1차 자원순환기본계획 및 국제 환경산업 동향에 따라 폐플라스틱의 국내 리사이클링 요구는 더욱 높아질 것으로 예상되나 이제까지 체계적이고 지속적인 폐플라스틱 리사이클링 기술개발이 추진되어 오지 않고 있다. 단편적으로 플라스틱의 분리기술이나²⁵⁾ 폐소형가전에서 배출되는 플라스틱의 재활용²⁶⁾에 대한 고찰은 있었으나 기술개발 방향도 물리적 리사이클링과 열분해 유효 등에 한정되어 있었다. 범부처적으로 추진할 미세플라스틱 대응을 위해서도 버려지는 플라스틱을 줄여야 하는 과제를 안고 있어 물리적 리사이클링이 어려운 저급, 혼합 플라스틱에 대한 화학적 재활용 등의 대안이 필요하다. 개인위생의 중요성 및 생활의 편리성 때문에 1회 용품의 규제와 사용을 줄이려는 노력에도 불구하고 1회성 플라스틱의 사용량은 좀처럼 줄어들지 않을 전망이다. 또한

전과정으로 환경영향을 평가한다면 종이나 목재로 만들어진 1회 용품이 플라스틱으로 만들어진 1회 용품 보다 더 환경친화적인지는 면밀하게 검토해봐야 할 문제이다.

폐플라스틱의 순환활용은 우리 삶의 질을 향상시키는 중요한 문제이므로 정부도 폐플라스틱 리사이클링을 위한 중장기 계획을 수립하여 기술개발에 많은 연구자원을 투입해야만 한다. 플라스틱 원료를 생산하거나 플라스틱 제품을 생산하는 기업에서도 발생점에서부터 리사이클링을 고려한 제품설계 및 소재개발에 힘써야 한다. 또한 플라스틱을 사용하는 소비자와 기업에서도 버려지면 쓰레기지만 모이면 자원이라는 인식의 전환을 갖고 분리수거 및 선별 배출에 최선을 다해야 한다. 우리나라 많은 환경기업이 영세한 기업역량을 갖고 있어서 때론 불법으로 폐플라스틱을 처리하는 등 사회적 문제를 일으키고 있는데 도덕적으로 책임감 있게 리사이클링 기술개발과 순환유통에 노력해야만 한다.

이미 플라스틱을 배제하고 일상을 생각할 수 없을 만큼 플라스틱은 우리 생활과 밀접하게 연결되어 있다. 플라스틱의 사용을 줄이는 것이 문제의 완전한 해결책은 아니며 폐플라스틱을 어떻게 리사이클링하고 효과적으로 활용할 것인가에 따라 폐플라스틱으로 인한 환경문제와 미세플라스틱 발생을 감소시킬 수 있고, 소각 및 매립에서 오는 2차 오염을 줄여 안정된 미래환경을 만들 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술사업, 유용자원재활용기술개발사업의 지원으로 추진되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Money Today : Article, <https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2018040219491194621>, April 2, 2020.
2. Naver Dictionary of Knowledge : <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=3557889&cid=43667&categoryId=43667>, April 2, 2020.
3. Korea Environmental Industry & Technology Institute : Public hearing of R&D program for microplastics, January 22, 2020.
4. Ministry of Environment : Regulation/policy, general environmental policy, http://me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EC%97%85%EB%AC%B4%EA%B3%84%ED%9A%8D&menuId=10260&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7261, November 26, 2019.
5. The Chosunilbo : Article, February 21, 2019.
6. Korea Petrochemical Industry Association : Information service, petrochemical products statics, <http://www.kpia.or.kr/index.php/info/main>, April 2, 2020.
7. Ministry of Environment : Enforcement rules for waste management (843, 2019. 12.), 2019.
8. Korean Statistical Information Service : Current status of population, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1B04005N&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=A6&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE, April 2, 2020
9. Korea Resource Recirculation Information System : Environmental statistics information, <https://www.recycling-info.or.kr/rrs/viewPage.do?menuNo=M130201>, 2019, April 2, 2020.
10. R&D Center for Valuable Recycling : Annual report 2016.
11. O-BASF : Chemrecycling, <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemrecycling.html>, April 2, 2020.
12. National Science & Technology Information Service (NTIS) : ntis.go.kr, April 2, 2020.
13. Ministry of Science and ICT : Briefing for government R&D program on 2019, https://www.msit.go.kr/web/msipContents/contentsView.do?cateId=_tsta5511&artId=1533925, April 2, 2020.
14. Ministry of Environment : 1st Basic plan for circulation of resources (2018~2017) www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10265&seq=7193, 2018, April 2, 2020.
15. ENTEWS : News of R&D project of microplastics, July 16. 2019.
16. Korea Environmental Industry & Technology Institute : What we do, development of future environmental technologies, <http://www.keiti.re.kr/site/keiti/mainB1.do>, April 2, 2020.
17. Korea Resource Circulation Service Agency : Core businesses, EPR policies, <http://www.kora.or.kr/eng/coreBusiness/eprPolicies.do>, April 2, 2020.
18. Korea Environment Corporation : Core business, What is the guarantee system of environment?, <http://www.keco.or.kr/group/group04/bussiness02/contentsid/1561/index.do>, April 2, 2020.
19. Korea Electronics Recycling Cooperative : Brochure, 2020
20. Woo-jin Choi, 2017 : Development of automatic sorting system based on artificial intelligence and laser-induced

- technology, R&D Program for Valuable Recycling, Brochure, p.41.
21. Ho-seok Jeon, 2014 : Development of advanced process system for ASR recycling, R&D Program for Valuable Recycling, Progress Report, p.62.
 22. Gyung-seok Kang, 2014 : Development of commercial technology for feedstock recycling and high end products from PET wastes, R&D Program for Valuable Recycling, Progress Report, p.14.
 23. Dae-su Lee, 2014 : Development of technology for the high value added resources from E-waste organic residue, R&D Program for Valuable Recycling, Progress Report, p.86.
 24. Heung-san Kye, 2016 : Developing eco-friendly technologies for physical and chemical recycling of PVC-related wasteful resources, R&D Program for Valuable Recycling, Final Report, p.55.
 25. Oh, Jae-Hyun, Kim, Mi-Sung, Shin, Hee-Duck, 2007 : Recent developments in plastic-plastic separation techniques, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 16(4), pp.47-60.
 26. Woo Zin Choi, Eun Kyu Park, Soo Kyung Kim, 2016 : A study on physical characteristics and plastics recycling of used small household appliances, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 25(1), pp.31-39.

조영주

- 한화케미칼 중앙연구소 책임연구원
 - 현재 유용자원재활용기술개발사업단 실장
 - 당 학회지 제21권 3호 참조
-

조봉규

- 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
 - 현재 유용자원재활용기술개발사업단 단장
 - 당 학회지 제18권 5호 참조
-