

유해폐기물 생애 전주기 흐름 기반 정보 관리 전략

이상훈*, 김정은

계명대학교 환경학부

42601 대구광역시 달서구 신당동 달구벌대로 1095

(2020년 6월 12일 접수; 2020년 8월 9일 수정본 접수; 2020년 8월 10일 채택)

An Information Management Strategy Over Entire Life Cycles of Hazardous Waste Streams

Sang-hun Lee*, and Jungeun Kim

Department of Environmental Science, Keimyung University

1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu, 42601 Korea

(Received for review June 12, 2020; Revision received August 9, 2020; Accepted August 10, 2020)

요 약

우리나라는 제조업 중심의 경제구조상 각종 유해폐기물이 발생하고 있으나 매립후보지가 적고 소각처리의 경우 미세먼지의 발생에 대한 우려가 커서 전통적인 폐기물 처리가 쉽지 않다. 더구나 최근에는 개발도상국의 유해폐기물 수입규제, 배달문화의 보편화와 보건위기사태까지 겹쳐 폐기물 수거 및 적체 문제가 심화되고 있다. 본 연구에서는 특히 최근 폐기물 국제 규제 관련 추세에 맞춘 국내 폐기물 정보관리 전략을 제시하려 하였다. 그 내용은 (1) 국내 유해폐기물 분류 코드와 바젤협약 등 국제적 코드와의 정합성을 제고하려는 노력을 지속해야 하며 (2) 폐전자제품내 희토류 등 저함량 성분의 혼합 유해성을 고려해야 하고 (3) 유해폐기물 전주기 위해성을 기반으로 하는 관리가 수행되어야 한다. 또한 (4) 올바로시스템, 화학물질배출·이동량 정보공개시스템 및 폐기물 수출입 자료 등을 서로 연동하여 폐기물 상세 흐름 정보를 구축하고 (5) 센서와 지리정보 시스템 등을 활용하여 폐기물 흐름의 감시와 불법오염지역의 예측이 필요하다. 마지막으로 (6) 청정기술과 전과정평가 등으로 처리/재활용의 최적대안을 선정/수행하는 것이 바람직하다.

주제어 : 폐기물, 유해성, 위해성, 정보관리

Abstract : Korea has an economy based on manufacturing industrial fields, which produce high amounts of hazardous wastes, in spite of few landfill candidates, and a significant concern for fine airborne particulates; therefore, traditional waste management is difficult to apply in this country. Moreover, waste collection and accumulation have recently been intensified by the waste import prohibitions or regulations in developing nations, the universalization of delivery services in Korea, and the global COVID-19 crisis. This study thus presents a domestic waste management strategy that aims to address the recent issues on waste. The contents of the strategy as the main results of the study include the (1) improvement of the compatibility of the classification codes between the domestic hazardous waste and the international ones such as those of the Basel Convention; (2) consideration of the mixed hazard indices to represent toxicity from low-content components such as rare earth metals often contained in electrical and electronic equipment waste; (3) management application based on risks throughout the life cycles of waste; (4) establishment of detailed material flow information of waste by integrating the Albaro system, Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) system, and online trade databases; (5) real-time monitoring and prediction of the waste movement or discharge using positional sensors and geographic information systems, among others; and (6) selection and implementation of optimal treatment or recycling practices through Life Cycle Assessment (LCA) and clean technologies.

Keywords : Waste, Hazard, Risk, Information management

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: shlee73@kmu.ac.kr; Tel: +82-53-580-5912; Fax: +82-53-580-5639

doi: 10.7464/ksct.2020.26.3.228 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

1. 서론

올바른 폐기물 관리는 자원순환이나 환경보호 및 국민보건 측면에서 매우 중요하다. 특히 우리나라는 국토가 좁고 인구밀도가 높아 매립후보지가 적고, 미세먼지나 황사 등 대기오염에 대한 우려로 전통적인 폐기물 처리방안인 폐기물 매립이나 소각처리를 지속적으로 적용하기가 쉽지 않다. 그럼에도 제조업 중심의 우리나라 경제구조의 특징으로 인하여 다양한 성상의 사업장 유해폐기물(지정폐기물)이 많이 배출되고 있는 실정이다. 더구나 최근에는 중국 등 개발도상국의 폐기물 수입금지조치, 배달문화의 보편화 및 COVID-19 보건위기사태로 일회용 폐플라스틱 및 감염성 의료 폐기물 발생량까지 늘어 폐기물 수거 및 적치문제가 대두되고 있다[1-4]. 국제적으로도 2010년 이후 런던협약으로 인한 슬러지 및 가축분뇨 해양투기 금지, 바젤협약 기반 유해 폐기물의 국가간 이동 금지 혹은 규제 강화가 이미 시행 혹은 논의 중이다[5,6]. 특히 바젤협약 등의 국제기구 및 개발도상국가에 의한 수입규제는 유해폐기물의 국내 적치로 이어져 폐기물 관리 측면에서 심각한 이슈로 생각된다. 바젤협약의 경우 2019년 확정된 금지개정안에 의해 선진국에서 개발도상국으로의 유해폐기물 이동이 전면 금지되며, 규제 대상 폐기물 항목도 기존 유해폐기물외에 폐플라스틱 등으로 확장되는 추세이다. 여기에 국내 유해폐기물 발생량의 지속적 증가가 맞물려져, 기존의 폐기물 관리 전략만으로는 국내외적으로 향후 폐기물 문제가 더 어려워질 가능성이 있다.

이러한 어려움은 궁극적으로 폐기물 발생량 저감과 청정생산 그리고 무엇보다도 폐기물 재활용의 극대화 및 고부가가치화를 통해 풀어나가야 된다는 점은 분명하다. 그러나 이러한 해결책은 관련분야의 정보화나 기술지원 등 다양한 분야에서의 구체적인 전략이 선행되어야 한다. 기존 국내 폐기물 관리 전략 도출은 많은 경우 부분적인 개선을 주제로 수행되었으나, 정보화를 포함한 보다 다양한 측면을 고려한 통합적인 대응전략을 다룬 연구는 아직 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는, 특히 폐기물의 수출입 관련 최근 여건 변화에 따른, 정보화 위주의 국내 폐기물 관리 전략을 제시하려 한다.

2. 연구방법

본 연구내용은 크게 세 항목(기존 폐기물 관리 전략, 기존 전략의 시사점/ 문제점 도출, 그리고 이를 해결하기 위한 향후 개선된 전략 제시)로 분류하였다. 시사점/문제점 도출과 전략도출을 위한 연구방법론은 문헌조사가 위주이며, 각 항목을 폐기물의 생애 전 주기(발생/수입 → 수거/이동 → 처리/재활용 → 폐기/수출)에 부합하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기존의 국내유해폐기물 관리

국내 폐기물의 분류는 폐기물 관리법에 의거 배출원별로 생활폐기물과 사업장폐기물로 구분하고, 사업장 폐기물은 사업

장생활폐기물과 사업장배출 시설계폐기물 그리고 사업장에서 발생된 유해폐기물을 의미하는 지정 폐기물로 구분한다[7]. 국내 유해폐기물 관리는 사실상 지정폐기물 관리가 중심이다. 한편, 국내 수출입폐기물은 또 다른 분류체계를 지니고 있는데 폐기물국가간이동법에 의거 수출입 규제폐기물과 수출입 관리 폐기물로 구분하고 있다[8]. 이러한 이원화는 국내 폐기물 분류는 국내실정을 우선하여 지정 및 변경이 가능하지만 수출입 폐기물의 경우 일차적으로 국제협약 즉 바젤협약에 의거한 분류를 따라야 하기 때문이다. 우리나라 지정폐기물의 유해성 평가는 폐기물 시료 내 혹은 해당 시료의 용출액 내 유해성분 종류 및 함량을 통하여 주로 평가하며(물질, 농도 규제, 용출 농도규제), 추가적으로 물벼룩이나 Zebrafish 등을 이용한 생물독성평가를 수행할 수도 있다. 또한 폐기물 재활용 전 재활용 환경성 평가제도 등을 통해 재활용품의 유해성을 평가할 수도 있다[9,10].

국내 폐기물 관련 인허가나 폐기물 흐름 등의 정보화는 올바로시스템을 통한 신속한 폐기물 인허가 및 흐름 감시가 대표적이다[10]. 가령 올바로시스템 구축 전에는 국내 사업장폐기물 수거 인허가 신청/접수시 인허가 서류 분실 및 행정 관리/감독 시간 소요로 인한 위반사항 색출 등에 어려움이 있었다. 수출입 폐기물의 경우에도 올바로수출입 시스템을 통해 허가 혹은 신고사항을 신청하고 관계기관이 시스템 상에서 이를 검토 및 승인여부를 결정하도록 되어 있다[11].

폐기물관리법상의 분류에 따른 폐기물 발생량/처리량 자료는 올바로시스템 등에서 공개되나, 유해성분이 함유된 폐기물의 발생원과 발생원별 발생/이동/처리량 등은 PRTR (Pollutant Release and Transfer Register: 우리나라의 경우 화학물질 배출·이동량 정보공개) 시스템을 통해 일반에게 공개된다[12]. 특히 이 시스템은 임의의 오염성분(단원자 혹은 화합물)이 포함된 (예를 들면) 폐기물의 배출량과 배출원을 공개하고 있다. 폐기물 관련 여타 정보사이트 예를 들면 올바로시스템에 의한 폐기물 분류(가연성/불연성, 폐유리/폐금속, 소각/재활용/매립 등)에 비하면 PRTR 목록(비소/니켈/수은 등 주로 원소나 분자 형태)이 보다 상세하여 폐기물내 유해성분의 존재와 해당 성분이 존재하는 폐기물 발생량 또는 이동량을 발생원 별로 파악하는데 유용하다[13,14].

한편 우리나라는 좁은 국토와 높은 인구밀도로 인해 향후 수십년내 국내 매립 후보지가 포화될 가능성에 직면에 있으므로, 자원순환을 통한 직매립량 감소가 매우 중요하다. 또한 국내 공급용 원자재를 대부분 수입에 의존하는 국내 여건을 고려하면 폐기물내 유가성분을 다시 회수/공급하여 원자재 공급의 안정성을 제고할 수 있는 자원순환의 장점이 또 부각된다 - 여기서 자원순환은 폐기물 재활용률의 극대화 뿐 아니라 순환자원의 고부가가치화 등도 포함된다. 다만 생활가전, 건설폐기물, 사업장배출시설계폐기물 등의 자원순환과 비교해서 유해성을 지닌 상당수의 지정폐기물 자원순환은 쉽지 않은 것이 현실이다. 따라서 가연성 지정폐기물과 감염성을 지닌 병원폐기물 등의 상당수는 아직 자원순환 대신 소각에 의존해야 하는 현실적인 측면이 있다[14]. Figure 1에 지금까지 설명한 보편적인 폐

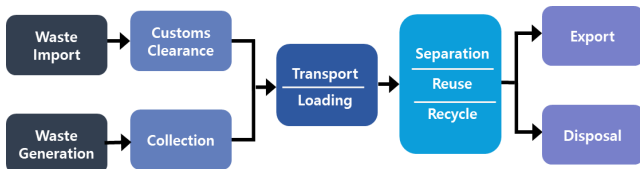


Figure 1. Demonstrated waste streams.

기물 흐름을 도식화하였다.

3.2. 현 폐기물 관리의 시사점 및 문제점

현재 국내의 폐기물 분류 방식(생활폐기물, 사업장 폐기물 그리고 사업장 폐기물내 지정폐기물 등)에는 여러 문제점이 있다. 특히, 이러한 분류에 기반한 지정폐기물 중심 유해성 관리는 최근 미세플라스틱이나 연소시 발암성 물질 생성 등의 원인 물질로 지목되는 생활계 폐플라스틱 같은 폐기물의 관리를 소홀히 할 수 있다는 문제점이 있다. Table 1을 보면 생활계 혹은 사업장배출시설계 폐플라스틱 등이 포함된 폐고분자화합물의 비중 및 연도별 증가량이 상당하다는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 분류방식은 국제기준 특히 유해폐기물 분야의 대표적인 국제협약인 바젤협약의 유해폐기물 부합기준과도 거리가 있다. 이로 인해 당연히 국내 폐기물 관리법에 의거한 지정폐기물과 수출입폐기물 상의 유해폐기물인 규제대상 폐기물의 품목도 서로 맞지 않는 부분이 존재한다는 문제가 대두된다[15].

유해성 평가 측면에서도, 기존의 평가기법 예를 들면 폐기물내 혹은 폐기물에서 용출된 유해성분(6종 중금속 등) 및 함량기반 평가나 생물독성 평가는 폐기물의 다양한 전환 또는 수용체로의 노출 과정을 제대로 반영하지 못한다는 한계가 있다. 예를 들면, 최근 문제시 되는 아세안 국가내 폐전기전자제품 및 폐플라스틱 재활용 과정에서 발생하는 연무(Fume)이나 다이옥신 그리고 미세플라스틱에 의한 해양오염 등은 기존의 평가 상의 시나리오에 미포함될 수도 있다[16,17]. 또한 미량성분 예를 들면 희유금속이나 희토류의 유해성도 존재함에도 이들의 함량이 희소하다는 이유로 분석대상 유해성분에서 제외되는 경우도 흔하다. 그러나 이 경우 단일성분만 따지면 폐기물내 혹은 누출매질내 해당 성분함량이 적어 개별 유해성은 무시할 만하더라도 이러한 개별 성분이 혼합된 상태에서의 통합 유해성은 유의미해질 수도 있다[18,19].

정보관리의 측면에서도 문제가 있는데, 예를 들면 올바른 시스템상의 국내발생폐기물과 수출입폐기물 관리의 이원화가 되어 수입된 폐기물의 국내 흐름 혹은 수출된 폐기물의 해당 수입국에서의 흐름이 분명히 구분되거나 파악되지 않는다는 문제점이 있다. 심지어 이러한 이원화는 수출입폐기물 인허가 및 관리감독 주체의 경우에도 존재한다. 올바른 정보관리를 위하여 폐기물 발생/ 반입/처리/보관 및 (수출입폐기물의 경우) 통관시의 허위기재나 불법흐름에 대한 감시/감독이 수반되어야 하는데 인력부족 및 구체적 감시/분석 방안의 미구축이 문제도 존재한다[15].

PRTR의 경우, 시스템내 자료가 방대하기는 하지만 PRTR

목록에 포함된 해당 오염 성분(예를 들면 유해성 원자나 분자 성분)은 일정 수준이상의 유해성을 지닌 물질에 제한된다. 반면, 회수가치가 높은 리튬 같은 성분은 (심지어 최근 어느 정도 유해성의 존재가 제시되었는데도) PRTR 목록에 포함되어 있지 않다. 그리고 폐기물내 해당 성분이 정확히 어떤 성상으로 얼마나 포함되어 있는지는 PRTR만으로는 알기 힘들다는 한계도 있다. 이들 배출자료는 업체의 최근 실시간 배출현황이 아닌 개별업체 보고자료를 취합하여 정리 후에 공지하기 때문에 업체의 경영현황 급변에 따른 폐기물 배출정보의 변경이 PRTR 시스템에 적시에 반영/공개되기가 사실상 불가하다. 또한 올바른시스템과 유사한 이슈로 배출현황 자료가 별도의 검증절차를 거치지 않으면 허위기재나 오류의 소지가 있다는 한계가 있다. 현재 우리나라의 폐기물 정보시스템 자체는 비교적 일찍부터 잘 갖추어져 있는 편이나 분류 및 책임소재의 일원화, 폐기물 성상 등 정보의 구체화, 정보 수집 및 공개의 신속화 및 정보 신뢰도 유지를 위한 검증과 관리감독이 중요한 이슈라고 볼 수 있다.

처리 및 자원순환 측면에서는, 현재 통계수치만 보면 국내 폐기물의 재활용률이 매우 높아 자원순환이 원활한 것으로 보인다. 문제는 여기서 재활용률은 전체 폐기물 중 재활용 경로로 유입되는 폐기물의 비율을 의미하는 것이지 실제 재활용에 이용된 폐기물량의 비율(실질 재활용률)을 의미하는 것이 아니라는 점이다[20]. 또한 처리 혹은 재활용 등 관리대상 폐기물 산정시 연도별 발생량은 올바른시스템이나 PRTR 사이트에서 공식되지만 불특정 위치내 적치/매립 또는 가정 등에 보관중인 소위 잠재적 폐기물량은 파악이 어렵다[21]. 예를 들어, 용도폐기된 폐휴대폰은 다양한 유가성분이 함유되어 있지만 정보보안 등 여러 이유로 소비자가 폐기처분하지 않고 가지고 있는 경우도 많다, 이러한 폐제품은 언젠가는 폐기되어 처리/재활용 시설에 유입될 수 있는 잠재적 폐기물이지만, 이러한 잠재적 폐기물량에 대한 표준화된 산정방법은 아직 연구가 더 필요해 보인다[21]. 재활용 지표나 폐기물량 산정문제 외, 국내 폐기물 재활용 및 처리공정에도 여러 문제가 있는데 가장 큰 문제는 재활용 공정의 원료 폐기물의 성상이 너무 다양하고 이물질이 많아 후단 재활용 공정의 효율, 생산성 및 부가가치성이 저하된다는 것이다. 예를 들면 PET병의 경우 색상이 다양하고 부차이물질이 많으면 재활용이 사실상 힘들며, 심지어 마크 부착시 유해성분이 함유된 접착제를 이용하여 분리하기도 힘들고 유해성이 유지되는 경우도 흔하다. 또한 재활용 공정 중 저농도 유가금속 습식회수에 흔히 이용되는 유해 침출제나 소각에 의한 다이옥신 발생 그리고 재활용품의 저품질 문제도 지적되고 있다[17,22,23].

3.3. 국내 유해폐기물 현안 해결을 위한 향후 전략

분류와 평가 측면에서, 지정폐기물외 생활계폐기물이나 배출시설계폐기물 중 폐합성수지 같이 발생량이 많으면서도 미세플라스틱이나 연소시 유해물질을 배출하는 폐기물의 경우, 유해폐기물에 준해서 관리하는 것이 바람직할 것으로 사료된다[15]. 또한 국내 폐기물 및 수출입폐기물 코드를 바젤협약상

Table 1. Waste generation in Korea

		2013	2014	2015	2016	2017	2018		
Total		48,728	49,915	51,247	53,772	53,490	56,035		
Household (Municipal) Waste	Mixed waste in volume-based waste fee system	Sub-total	22,292	22,264	23,170	24,965	24,638	25,573	
		Paper	5,383	5,410	5,445	5,631	5,194	5,185	
		Plastic	3,126	3,370	3,739	4,312	4,601	4,884	
		Glass	499	536	623	561	608	739	
		Metal	347	392	448	434	400	931	
		Others	12,937	12,556	12,915	14,027	13,835	13,834	
	Recyclable waste	Sub-total	13,935	14,429	13,857	14,418	14,452	15,985	
		Paper	4,128	4,485	4,514	4,603	4,151	4,281	
		Plastic bags	1,335	1,431	1,454	1,710	2,169	2,315	
		Plastic	1,239	1,237	1,200	1,133	1,251	1,491	
	Food waste	Others	7,233	7,276	6,689	6,972	6,881	7,898	
Sub-total		12,501	13,222	14,220	14,389	14,400	14,477		
General Industrial Wastes (Non-hazardou s industrial wastes from process facilities)	Total		148,443	153,189	155,305	162,129	164,874	167,727	
	Combustible	Sub-total	34,539	35,326	39,423	38,912	40,137	40,646	
		Paper/Wood	1,746	2,101	2,423	2,518	2,876	3,337	
		Synthetic Polymer	9,803	10,526	11,674	11,993	13,038	13,702	
		Organic sludge	16,838	16,726	18,072	16,921	16,937	15,432	
		Others	6,152	5,973	7,254	7,480	7,286	8,175	
	Incombustible	Sub-total	113,904	117,863	115,882	123,217	124,737	127,081	
		Mineral	7,478	21,811	31,397	45,733	44,549	46,122	
		Ash	22,397	22,895	28,241	37,309	39,248	39,406	
		Metal	27,680	12,594	12,648	2,399	2,584	2,092	
		Inorganic sludge	14,483	16,610	17,851	17,744	19,146	18,920	
		Others	41,866	43,953	25,745	20,032	19,210	20,541	
	Construction Wastes	Total		183,538	185,382	198,260	199,444	196,262	206,951
		Wasted materials	Sub-total	150,331	151,026	163,190	166,494	162,139	172,356
Concrete			111,653	114,908	124,451	128,092	123,248	131,040	
Asphalt-concrete			35,398	33,725	35,509	35,192	35,861	37,759	
Others			3,280	2,393	3,230	3,210	3,030	3,557	
Combustible		Sub-total	2,418	2,519	2,588	2,237	2,614	2,652	
		Wood	704	866	923	806	800	805	
		Synthetic Polymer	1,695	1,586	1,654	1,420	1,803	1,826	
		Others	19	67	11	11	11	21	
Incombustible		Sub-total	1,058	877	1,036	2,012	1,871	1,300	
		Sludge	1,052	707	995	1,922	1,822	1,250	
		Others	6	170	41	90	49	50	
Earthen		5,067	5,863	7,659	6,478	7,478	7,101		
Mixed waste		24,664	25,097	23,787	22,223	22,160	23,542		
Specified Wastes (Hazardous Industrial Wastes)	Total		12,407	13,172	13,402	13,783	14,905	15,389	
	Specified Wastes from industry	Sub-total	11,993	12,707	12,854	13,187	14,305	14,736	
		Acid	1,907	2,066	2,098	2,177	2,396	2,734	
		Alcaline	175	166	185	195	316	249	
		Oil	2,439	2,557	2,773	2,814	2,936	3,103	
		Organic Solvent	2,895	2,942	2,882	2,892	3,090	3,236	
		Synthetic Polymer	41	45	49	56	54	58	
		Dust	1,692	1,837	1,735	1,692	1,833	1,581	
		Sludge	991	1,208	1,133	1,194	1,358	1,299	
		Others	1,853	1,885	1,998	2,168	2,323	2,476	
	Medical wastes		415	466	549	596	600	653	

의 폐기물 코드와 가급적 일대일 맞춤이 가능하게끔 비교분석하고 필요하면 분류방식의 부분 개정도 필요하다. 또한 유해폐기물 분류시 기존 유해성분함량이나 생물독성 평가결과 이외에 폐기물 전주기 흐름을 대상으로 했을 때 유의미한 위해성 여부를 기반으로 관리대상 폐기물을 선정하는 방식이 더 바람직하다고 생각된다. 예를 들면, 폐전자전기제품 중 희유금속 성분 중 일부는 유해성분으로 분류되고 있지 않으나 폐전자전기제품을 파분쇄하는 과정에서 먼지나 연무가 발생할 수도 있고 재활용을 위한 회수 시 유해성 첨가제를 필요로 하는 경우가 있다[16]. 또한 인도네시아에서는 두부공장내 페플라스틱을 연료로 소각시키다 소각생성물이 인근 가축이나 인체에 악영향을 끼치는 경우도 있다[17]. 이러한 피해는 비단 폐기물 고유의 유해성분 아니라 폐기물 전주기내 여러 물리화학적 및 생물학적 전환 과정을 거치면서 유해물질을 생성시켜 환경을 오염시킨다고 할 수 있다.

이 경우 위해성평가를 통해 폐기물 전주기 대상으로 한 위해도를 예측할 수 있다. 일반적으로 위해성 평가는 유해성 평가 이후에 독성/유해성의 용량 및 시험 동물체(수용체)내로의 노출량 변화에 따른 악영향 여부를 관측하는 용량-반응 평가를 수행한다. 여기서, 노출용량이 어느 정도로 감소할 때 악영향이 발생하지 않는지(비발암성의 경우 악영향무관찰량) 혹은 기준치 이하로 발생(발암성의 경우 발암 가능성 10^{-6} 이하)하는지를 규명한다. 이 후 노출평가를 통해 수용체가 유해 물질로부터 노출된 강도나 빈도 및 기간 등을 산정하여 정량화 한다. 그리고 마지막으로 위해도를 산정하는데 이 경우 폐기물의 유해성만 고려할 경우보다 수용체 입장에서 더 합리적인 피해 가능성을 예측할 수 있다[24].

폐전기전자제품의 경우 다양한 유해성분(금속, 비금속, 준금속, 유기물 등)이 함유될 수 있는데 이러한 성분은 여타 성분과는 별개로 독립적으로 유해성을 나타내기도 하지만 많은 경우 다른 성분과의 상호작용으로 유해성이 증가(synergism) 혹은 감소(antagonism) 할 수 있다[25]. 이러한 혼합오염물질의 특성은 독성/유해성 평가뿐 아니라 용량-반응평가에도 영향을 미친다. 폐기물 특히 폐전기전자제품내에는 처리시 환경적 위해를 발생시킬 수 있는 성분(예를 들어 베릴륨, 안티몬, 희토류 등)은 더 다양하며 개별성분의 함량 또는 농도가 낮더라도 혼합의 위해도는 유의미할 수도 있다. 따라서 이러한 혼합 위해도 고려하고 이에 대한 기준을 도입하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 위해성 평가의 대상 수용체는 일차적으로 인근 거주민이 될 것이고 부가적으로 동식물 등 환경생태요소를 고려할 수 있다. 그러나 후자의 경우 수용체의 종류나 특성이 너무 다양하여 올바른 위해성 평가에 장시간과 비용이 소모될 수도 있을 것이다. 따라서 신속한 예비위해성평가를 적극 활용하여 일차적으로 인체에 대한 영향을 고려하며 생태요소의 영향을 가능할 경우에는 노출경로를 단순화되 생물부리나 생태피라미드에 따른 생물농축에 유의해야 할 것이다[26,27].

정보관리 측면에서, 폐기물의 국내 발생량 자료는 일단 올바른 시스템과 PRTR 시스템 및 유사 물질흐름자료를 통하여 유추할 수 있다[28]. 다만 이러한 자료가 사실상 수년 전 과거자

료이기 때문에 현재~미래의 수치가 필요하다면 연도별 추세나 회귀분석 혹은 동적모델링을 통해 추측하거나 직접 현장조사를 통해 확인 및 보강해야 할 것이다. 최신 수출입현황이 필요할 경우 우리나라나 미국, EU 등의 수출입 자료를 인터넷을 통해 얻을 수 있다. 우리나라의 수출입 통계자료는 매월 15일에 전월을 자료가 공개된다. 우리나라에 상당량의 폐배터리를 수출하는 미국의 수출입현황을 파악하려면, US trade online 같은 인터넷 사이트를 참조하면 된다. 당월보다 1-2달 정도 이전까지의 미국내 수출입금액(미화) 및 중량(항공, 컨테이너 해상화물 및 총 해상화물)을 공개하며 품목은 HS (Harmonized System) 혹은 NAICS (North American Industrial Classification System) 코드에 따라 분류되며 사용자가 선택할 수 있다. 폐기물 품목(commodity)은 고급검색 옵션에 폐기물 관련 키워드(Waste나 Scrap 등)를 검색하면 코드별 품목명에 해당 키워드가 포함된 코드명과 품목명이 선정된다. 상대국가 혹은 지역(대륙 혹은 OECD 등 국가집단)을 선정하고 기간을 설정하면 요구조건에 맞는 자료가 Table이나 Chart 형태로 산출된다[29]. EU의 수출입자료(Eurostat)도 미국 US trade online 수출입자료와 전반적으로 유사하나, 코드가 더 다양하고 EU 회원국이 많은 관계로 한번 검색에 EU 회원국 여러 나라의 수출입 현황을 볼 수 있는 장점이 있다[30]. 이러한 수출입 자료를 독자개발 혹은 국제협력으로 Web scraping 및 Big data processing 프로그램을 통해 한 번에 다수의 조건 검색(예를 들어 EU에서 우리나라로 수출되는 유해 폐기물의 총량 등)을 실시하고 그에 따른 물질흐름정보를 신속히 편리하게 얻을 수 있도록 데이터베이스 시스템을 연동/구축한다면 해당 국가에서 우리나라로 수입되거나 반대로 해당국가로 수출되는 폐기물 현황을 어느 정도 파악할 수 있을 것이다.

이러한 수출입 정보가 올바른시스템내 데이터베이스에 연동되도록 하고 이 후 폐기물 관리용 올바른 시스템을 통해 국내로 폐기물 흐름 정보가 공유되도록 한다. 또한 본 연구에서 지적한 올바른시스템의 문제점, 예를 들면 정보흐름의 일관화와 인허가자료와 통계자료의 검증 및 감시/감독 강화가 개선되어야 하며, 향후 증가가 예상되는 폐기물(예로 폐전자전지제품이나 페플라스틱 등)에 대한 상세 정보 공개가 수반되어야 할 것이다.

지정폐기물의 경우 폐기물내 유해성분이 존재하거나, 유해성이 의심되면서도 국가경제적 측면에서 가치가 있는 “유해성 유가성분”이 함유된 폐기물 현황을 신속히 확인하는데 PRTR이 유용하다. 따라서 이러한 시스템을 통한 현황파악을 기반으로 발생 폐기물 중 우선적 처리/관리 혹은 자원화(회수/재활용/자원순환) 대상을 선정하는 것도 고려해 볼만하다. PRTR을 통한 스크리닝 후 주요 배출 업체를 직접 방문하여 사업장내 유해성 유가금속 함유 폐수 및 폐기물 배출 실태를 상세히 파악한 후 회수기술 적용여부를 타진해 볼 수 있을 것이다.

또한 유가금속의 경우 PRTR 자료와 국가통합자원관리시스템 상의 금속별 물질흐름 자료 등을 서로 연동하여 주요 금속의 Value chain별 물질흐름과 유해성 유가금속이 포함된 폐수/폐기물의 배출량 및 배출업체를 더 잘 파악할 수 있을 것이

Table 2. Useful websites on domestic and international waste management

Categories	Hyperlinks	Ref.
Domestic waste management: overview, history, and classification	https://me.go.kr/gg/web/index.do?menuId=2272	[7]
Allbaro system: backgrounds, history, system overview (top), and statistical data on domestic wastes (bottom)	https://www.allbaro.or.kr/06_wsi/wsi_system_intro.vm https://www.allbaro.or.kr/02_wss/wss_ManyPeople.vm	[11,14]
Domestic TRPR (Transfer Register and Pollutant Release) system	https://icis.me.go.kr/prtr/main.do	[12,13]
Basel convention & International hazardous waste issues	http://www.basel.int/	[6]
Basel Action Network: a private network on international hazardous waste issues	https://www.ban.org	[16,17]
ISO (International Organization for Standardization) 14040 on Environmental Management and Life Cycle Assessment	https://www.iso.org/standard/37456.html	
Trade statistics of USA (top) and EU (bottom)	https://usatrade.census.gov/	[29,30]

다[31]. 참고로 국가산업측면에서 유용한 금속은 한국광물자원공사나 한국 희소금속산업기술센터 주관 국가통합자원관리시스템에서 선정하는데, 보통 리튬, 코발트, 니켈, 희토류 등이 있다. 이 중 환경부 주관 PRTR 사이트의 조사 항목(환경적으로 유의미한 유해성분)에서 기선정된 유가금속들이 포함되어 있는지 확인하면 회수처리가 시급한 유해한 유가금속을 파악할 수 있다.

단 이러한 연동시스템에서 폐기물 흐름을 상세히 확인하려면 시스템간 품목 및 단위의 정합성 확인, 폐기물내 유해성분의 함량 및 구체적 성상이 더 분석 및 공개되어야 한다. 또한 자료에 대한 감시 및 검증이 수반되어 자료의 신뢰도가 유지되어야 한다[15]. Table 2에 본 연구에서 언급한 유용한 웹사이트 주소를 정리하였다.

상기 폐기물 흐름자료의 실시간 감시추적과 예측은 GPS/GIS/RS와 같은 지리기반 IT (information technology) 시스템을 통해 가능하다[32,33]. 이러한 IT 기반 추적 시스템은 전술한 폐기물 흐름 관련 통계 결과의 약점을 보강해 준다. 대체로 폐기물 흐름 관련 통계치는 실시간이 아닌 짧아도 2-3달 길면 2-3년의 시차를 두고 공개된다. 또한 폐기물 흐름의 상세 지리적 정보파악이 어렵다는 한계가 있다. 반면 GPS 센서를 폐기물에 부착시켜 GIS/RS를 통해 폐기물 흐름을 Mapping하고 실시간으로 탐지하는 방법은 국가간 혹은 국내 폐기물 이동 특히 밀수 등 불법이동 경로를 탐지해 내는데 매우 유용한 것으로 보인다.

일례로 Lee et al. [3]는 GPS 추적센서를 폐기물에 폐전자제품에 부착시켜 추적조사를 실시하였다. 추적 대상 폐기물 개수는 폐CRT 모니터(76개 시료)와 폐LCD 모니터(72개) 및 폐프린터(57개)로 총 200여개였다. 결론적으로 이들이 추적된 이동기간은 평균 72일이었으며 평균 추적거리는 무려 4220 km에 달하였다. 그리고 대략 70개에 가까운 폐기물이 해외로 이동하였으며 목적지는 대부분 홍콩, 중국 및 대만과 같은 극동 아시아 국가들이었고, 이외에 파키스탄, 태국 등도 있었다. 반면, 당 연구에서 이러한 폐기물의 GPS 추적시스템의 향후 개선이 필요한 사항도 지적되었는데, 첫째가 다수 센서의 오작동 및 작동중단 사태이다. 예를 들면, 추적센서 기기가 액상 폐기물내 잠길 경우, 센서와의 무선연결이 차단 되거나 위치정보의 정확

도가 감소될 경우, 배터리 고장이나 피추적자에 의한 인위적 혹은 자연적 분리처분의 우려도 존재한다. 또한 이러한 추적행위가 개인/법인의 정보보안 관련 논란의 여지도 있을 것이다. 이러한 약점에도 불구하고 GPS 추적시스템은 현재로는 폐기물의 단기적 흐름을 실시간으로 파악하고 폐기물 흐름관련 통계치를 검증할 수 있는 적절한 방안으로 판단된다.

GIS나 RS 기술은 전술한 GPS 추적결과와 Mapping 외에도 지구통계(geostatistics) 및 공간요인분석(spatial factor analysis)을 통해 폐기물 흐름 감시 뿐 아니라 관련 잠재적 오염 지역(예: 쓰레기산)을 예측하는데 이용될 수 있다. 미지의 폐기물 불법 투기/매립은 중대한 환경 문제임에도 국내외적으로 여전히 잘 관리되지 못하고 있는데 최근 폐기물 수출에 문제가 생기면서 이러한 경향은 심해지고 있다. 따라서 상기 IT 기술을 통해 불법 폐기물 투기/매립 장소를 특징짓는 어떠한 기준을 설정할 수 있다. 일례로, 기존의 불법 투기/매립지와 인근 지리적 공간적 조건을 분석한 결과, 폐기물 불법 행위는 교통측면에서의 접근성과 적발이 쉽지 않은 낮은 인구밀도 등과 관련이 높은 것으로 나타났다. 그리고 Matsumoto and Takeuchi [34]이 수행한 또 다른 연구결과에 따르면 일본내 폐가전제품 불법투기 주기는 해당 지역의 실업률, 처리비용 및 법적 강제력과 상관관계가 있음을 발견하였다. 이에 따라 임의의 지역의 인구분포, 도로조건 및 지역 네트워크 등을 통해 향후 불법투기/매립 발생 가능성을 타진할 수 있다. 그리고 이러한 가능성은 임의의 지점에서의 불법 폐기물 존재 가능성을 mapping 하는 식으로 가시화될 수 있다. 그리고 이러한 결과물은 RS나 GPS 추적 기술이나 현장방문 등으로 보완 및 검증할 수 있을 것이며, 더 나아가 불법행위 발생 예상 지역 인근 지역민의 적극적 불법투기 감시 및 고소/고발을 통해 실제 불법행위 발생을 사전에 예방할 수 있을 것이다.

폐기물의 배출원 위치나 이동경로의 mapping을 위해 GIS (geographic information system)를 여타 폐기물 흐름 데이터베이스와 연동하는 것이 효과적이다. 예를 들어 폐기물 수출입 자료는 한 국가내 폐기물의 Input과 Output양을 나타낸다고 하면 폐기물 관련 지리정보는 국가내 혹은 국가간 폐기물 발생위치 혹은 이동궤적을 나타내기 때문에 중요하다 볼 수 있다. 이는 문제시 되는 폐기물의 발생이나 이동을 직접 관리자가 확

인할 필요가 있을 때 GIS를 통해 해당 폐기물의 지리적 위치를 정확히 파악할 수 있다. 또한 불법 적치/매립/처리 등 부적절한 관리나 폐기물내 유해성분의 노출성 및 위해성 관련 문제가 모두 지리적인 요소와 밀접한 관련이 있으므로 연동된 GIS는 폐기물 불법지점 예측 및 색출에 중요한 Tool이 될 수 있다.

한편 처리나 재활용 측면에서는 물질흐름분석(Material flow analysis, MFA)이나 우선 실질 재활용률 지표 산정 및 활용이 급선무로 생각된다[20]. 원래 “재활용”이란 폐기물을 재이용하거나 폐기물을 재이용할 수 있는 상태로 만드는 활동을 의미한다. 예를 들면 페플라스틱의 경우, 이를 연료로 이용하여 열에너지를 발생시키거나 원자재로 이용하는 것 등이 여기에 포함된다. 따라서 재활용률이 높다고 하면 폐기물이 실제 재활용(연료 또는 원자재)에 투입되는 비율이 높다는 것을 의미하는 것이 상식적이지만, 현재 국내 폐기물관리에서 재활용은 전체 폐기물 중 폐기물재활용시설에 반입되는 폐기물량 전부를 의미한다. 이러한 지표의 문제는 재활용시설이 입고된 폐기물 중 재활용 공정 중에 폐기처분되는 부분이 무시된다는 것이다. 따라서 예를 들어 재활용시설에 입고된 폐합성수지의 실질 재활용률은 평균 87.5% 정도이다. 이는 12.5% 정도는 다시 폐기처분된다는 의미이다.

실질 재활용률을 산정하기 위해서는 해당 폐기물의 재활용 공정을 파악하여 물질흐름분석을 실시한다. 당연히 동일 폐기물이라 하더라도 재활용 시설 혹은 공정에 따라 실질 재활용율이 다르다. 보다 큰 스케일로는 폐기물별 국가적 수준의 실질 재활용률을 산정할 수도 있는데, 이는 해당 폐기물의 연도별 재활용량, 공정별 재활용량의 비율, 폐기물의 각 공정별 실질 재활용률을 통해 산정한다. 또한 3.2절에서 지적되었던 잠재적 폐기물량에 대한 산정방법은 해당 제품의 판매량이나 매출액(폐휴대폰의 경우 일정기간 동안 휴대폰 판매량에서 제품수명을 감안한 사용기간 동안의 폐기량을 빼면 대략적인 잠재적 폐기물량이 산출)등의 자료를 이용하거나 원단위(폐휴대폰의 경우 1인당 보유중인 휴대폰 개수의 평균 혹은 중간값)를 설정하여 추측하는 방안이 있을 것이다[21].

폐기물 재활용 지표나 폐기물량이 적합하게 산정되면 실제 폐기물 발생저감이나 처리/재활용 목적의 대안을 고려할 수 있다. 폐기물 발생저감 분야에서, 품목별 소비규제(예를 들면 페플라스틱 발생저감을 위한 1회 용품이나 포장재 이용 규제)는 해당 제품에서 발생한 폐기물의 저감이라는 측면에서는 효과적이거나 해당 제품의 생산/유통/판매자들에게는 경제적 불이익을 줄 수 있으며, 발생저감 대상 품목 설정에 대한 논거와 사유를 분명히 하지 않으면 불필요한 오해와 논란을 야기시킬 수 있다. 이에 전과정평가 즉 LCA를 이용하여 이해당사자들의 폐기물 감량을 위한 관련 품목 소비규제의 당위성과 투명성을 강조하고 더 나아가 이해 당사자들의 자발적 이해와 참여도를 높이게 될 것이다[27].

참고로 전과정평가(life cycle assessment)에서는 설정된 전체 시스템의 원료획득 및 가공, 제조, 수송, 유통, 사용, 폐기 및 재활용 단계까지의 전과정에 관련된 모든 투입물과 산출물의 관한 물질/에너지 관련 자료를 모두 취합하고 정리한 후, 투입물

및 산출물과 관련된 잠재적 환경영향을 다양한 측면에서 평가한다. 전과정평가는 국제표준화기구(International organization for standardization, ISO) 14040 및 14044에 따라 진행되며, 전과정평가의 수행단계는 목적/범위 정의(goal and scope definition), 전과정 목록분석(inventory analysis), 전과정 영향평가(impact assessment), 전과정 해석(interpretation)으로 총 4단계로 구성되며 각 단계들은 상호보완적으로 수행된다[35,36].

폐기물 감량을 위한 소비규제에 LCA가 적용된 사례는 많으며 대표적으로 UNEP에서는 일회용 비닐봉지와 유사대안제품(예를 들어 천연고분자화합물이나 종이 봉지) 중에 어느 것이 더 환경친화적이며 지속가능한 제품인지 객관적으로 평가하기 위해 다수의 LCA 연구결과를 검토하였다. 검토결과 다수의 LCA가 도출한 주요 결론은 일반적으로 인식되는 상식과 조금 차이가 있었는데 특히 생분해성 플라스틱이 일반 비닐봉지보다 전반적으로는 환경친화적이지만, 기후 영향, 산성화, 부영양화 및 독성 배출과 관련해서는 오히려 일반 비닐 봉지보다 안 좋을 수 있으며 일반 비닐 봉지도 특유의 내구성으로 재사용이 가능하며 재사용 횟수가 증가할수록 환경친화성도 증가한다는 결론이 도출되었다[37]. 이러한 LCA를 통해 폐기물 관리를 위한 최적 대안 선택시 막연한 결정이 아닌 보다 합리적이고 투명한 의사결정을 도모할 수 있을 것이다.

폐기물 감량에서 최종 처분까지 일련의 최적 대안이 구축되면 가급적 제품생산 이전, 즉 제품구상 및 설계 과정부터 해당 제품의 폐기 시 환경친화화와 자원 순환의 원칙을 고려하는 것이 바람직하다. 폐기물 관리의 기본원칙은 당연히 Upstream(전단) 단계에 중점을 두도록 한다[38]. 즉 감량화 > 재이용 > 재제조 > 재활용 > 처리의 순으로 관리 우선 순위를 정하여 청정제조 및 생산을 수행 하여야 한다. 현재 국내 재활용 과정의 문제 중 하나는 재활용품 품질에 대한 신뢰도가 낮다는 것인데, 이는 표준적인 품질기준이 미비하기 때문이기도 하다[39]. 따라서 재활용품 품질의 신뢰성 구축과 고부가가치화를 위해서는 재활용품 품질관리의 표준화 및 품질기준이 구축되어야 한다. 동시에, 재활용품 품질 등급별 수요처를 지속적으로 발굴한다면 자원순환이 원활하게 유지되는데 큰 도움이 될 것이다[40]. 한편, 최근 발생량이 증가하는 폐전자전기제품의 경우 폐기물 내에 함유된 유기물질(리튬, 코발트, 니켈 등)을 회수하는 것이 유용하다[41]. 이러한 저함량 다성분 금속의 회수에는 침출반응 기반 습식제련을 활용하는 것이 보편적이다. 이 경우 침출반응에 쓰이는 침출제가 근로자의 안전과 환경을 위협하는 오염물질이므로 미생물이나 생물근원 유기물질 같은 보다 환경친화적인 침출제를 개발하여 Test할 필요가 있다[42]. 또 다른 발생량 증가 중인 폐기물인 페플라스틱의 처리는 전술한 발생 감량과 더불어 물리적 선별을 통한 이물질 제거 및 대기오염발생이 적은 열분해 기술개발을 지원하는 것도 고려할 만하다[27].

4. 결론

국내 유해폐기물 분류코드와 수출입폐기물 및 바젤협약이나 OECD 같은 주요 국제적 코드와의 정합성 분석을 지속해야 한

다. 또한 최근 폐전자전기제품의 추세에 따라 유해성분의 목록도 더 확장하여 희토류 등 희소성분도 포함시켜야 한다. 그리고 혼합 유해도 산정방식을 활용하여 다성분 저함량 물질의 유해성도 고려해야 한다. 또한 유해성외에도 폐기물 전주기 위해성을 기반으로 우선 관리대상 폐기물 및 유해성분을 선정하는 것이 바람직할 것이다. 또한 위해성평가가 노출평가 등 번거로운 작업을 포함하기 때문에 보다 단순화한 간이 위해성 평가법을 개발 및 적용하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 이를 통해 예를 들면 관리 대상 성분목록 및 시나리오의 단계별 확장도도모하는 것이 바람직하다. 폐기물 흐름을 고려할 때 폐기물 생애 전주기(발생/수입, 수거/통관, 이송, 처리/회수/수출, 폐기 등) 동안의 관련 정보를 모아 연계된 데이터베이스를 구축하는 방안을 생각해 볼 수 있다. 즉 폐기물 관련 정보 시스템인 올라로스시스템에 구매소비량, 수출입량, PRTR 및 물질흐름자료 등을 연동시키는 것이 좋은 예이다. 또한 이런 흐름의 실시간 검증을 위하여 GPS/GIS/RS 기반 감시 시스템 구축하여 의심이 되는 폐기물을 추적하고 오염지역을 예측하는 방안도 효과적이다.

폐기물 흐름정보가 명확히 구축되면 실질 재활용률을 지표로 하여 폐기물 자원순환을 더욱 효과적으로 진척시킬 수 있다. 또한 폐기물 감량화, 재활용 및 처리 시 대안을 선정할 때 전과정평가(LCA)를 이용하면 객관적 논거를 도출할 수 있어 이해관계자를 설득하고 논의하는데 편리하다. 그리고 제품설계시부터 폐기물 감량화 > 재이용 > 재제조 > 재활용 > 처리의 우선순위를 고려하여 청정제조 및 생산을 수행하여야 한다. 재활용시에는 표준화 및 품질기준을 제시하여 신뢰도를 제고하고 재활용품 품질 등급별 수요처를 발굴하여 자원순환이 원활하게 한다. 최근 급증하는 폐전자전기제품 및 폐플라스틱은 청정기술을 통한 감량화와 더불어 각각 중요도 높은 유기물질(리튬, 코발트, 니켈 등)의 고효율 친환경 회수, 물리적 선별 및 열분해 기술개발을 지원하는 것도 고려할 만하다.

References

- Brooks, A. L., Wang, S., and Jambeck, J. R., "The Chinese Import Ban and Its Impact on Global Plastic Waste Trade," *Sci. Adv.*, **4** (2018).
- <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4174796> (accessed May 2020).
- <http://mn.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=4458868> (accessed May 2020).
- <http://www.monews.co.kr/news/articleView.html?idxno=210517> (accessed May 2020).
- International Maritime Organization, "The London Protocol; What It Is and Why It Is Needed," London Protocol Document (2016); URL: <http://www/imo.org> (accessed May 2020).
- <http://www.basel.int/> (accessed May 2020).
- <https://me.go.kr/gg/web/index.do?menuId=2272> (accessed May 2020).
- Um, N.-I., Park, Y.-S., Kim, Y.-J., Kim, W.-I., Park, S.-O., Lee, H.-S., Oh, J.-K., Kim, K.-H., and Lee, Y.-K., "Study on the Performance Improvement of Domestic Management System for Effective Control of Transboundary Movements of Waste," NIER, RP2018-087 (2018).
- Korean Ministry of Environment, "Hazard Assessment of Wastes and Information Delivery System," KMoE report (2013).
- <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/NIER/06/024/5667032.pdf> (accessed May 2020).
- https://www.allbaro.or.kr/06_wsi/wsi_system_intro.vm (accessed May 2020).
- <https://icis.me.go.kr/prtr/main.do> (accessed May 2020).
- <https://icis.me.go.kr/prtr/prtrInfo/mtrSearch.do> (accessed May 2020).
- https://www.allbaro.or.kr/02_wss/wss_ManyPeople.vm (accessed May 2020).
- Korea Ministry of Environment, "A Study on Improvement of the Domestic Management System for Waste in Trade," KMoE report (2019).
- <https://www.ban.org/news/2019/12/13/the-price-of-recycling-old-laptops-toxic-fumes-in-thailands-lungs> (accessed May 2020).
- <https://www.ban.org/news/2019/12/20/indonesia-lets-plastic-burning-continue-despite-warning-on-health-danger> (accessed May 2020).
- Lee, S.-H., and Jo, Y.-M., "Review of National Policies on the Utilization of Waste Metal Resources," *KIC. News.*, **13**(1), (2010).
- Korean Occupational Safety and Health Agency, "Classification Guideline for Chemical Hazard and Safety," Kosha Guide W-16-2016, (2016).
- Kim, G.-G., Jang, Y.-C., Yi, S.-R., Lee, S.-W., Jeong, M.-J., Jeon, T.-W., and Shin, S.-K., "Determination of Actual Recycling Rates at Waste Plastic Recycling Facilities Using Material Flow Analysis," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **30**(2), 136-143 (2013).
- Jeong, M.-J., Jeon, T.-W., Shin, S.-K., Kang, Y.-Y., Kim, W.-I., Chung, D., Oh, G.-J., Kim, N., Yeon, J.-M., and Jeong, Y.-W., "Prediction of Potential Waste Generation and Its Recycling," NIER-RP, 2011-1341 (2011).
- Kim, H.-W., Um, N., Park, Y.-S., Lee, Y., and Kim, K.-H., "A Study on the Status and Policy Direction of Collection and Recycling of Waste Plastics," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **35**(6), 471-480 (2018).
- Kim, Y.-S., "Recovery of Valuable Metal from E-wasted Electronic Devices," *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, **49**(6), 477-485 (2016).
- Korea Ministry of Environment, "Guideline for the Preliminary Risk Assessment at the Early Stage Using Pollutant Release Information," KMoE report (2009).
- Heys, K. A., Shre, R. F., Pereira M. G., Jones, K. C., and

- Martin, F. L., "Risk Assessment of Environmental Mixture Effects," *RSC Adv.*, **6**, 47844-47857 (2016).
26. Korea Ministry of Environment, "Guideline for the Preliminary Risk Assessment at the Early Stage Using Pollutant Release Information," KMoE report (2009).
 27. Lee, S.-H., "Current Status of Plastic Recycling in Korea," *J. Korean Inst. of Resources Recycling*, **26**(6), 3-8 (2019).
 28. Lee, S.-H., "Preliminary Status Analysis Methodology on Hazardous and Valuable Metal Recovery in Industrial Wastes Using Public Database," *J. Korean Inst. of Resources Recycling*, **29**(2), 48-54 (2020).
 29. <https://usatrade.census.gov/> (accessed Jun. 2020).
 30. Eurostat, "User Guide on European Statistics on International Trade in Goods", Eurostat: Manuals and Guidelines (2016).
 31. <https://k-mfa.kr/> (accessed Jun. 2020).
 32. Jordá-Borrell, R., Ruiz-Rodríguez, F., and Lucendo-Monedero, Á. L., "Factor Analysis and Geographic Information System for Determining Probability Areas of Presence of Illegal Landfills," *Ecol. Indic.*, **37**, 151-160 (2014).
 33. Lee, D., Offenhuber, D., Duarte, F., Biderman, A., and Ratti, C., "Monitour: Tracking Global Routes of Electronic Waste," *Waste Manage.*, **72**, 362-370 (2018).
 34. Matsumoto, S., and Takeuchi, K., "The Effect of Community Characteristics on the Frequency of Illegal Dumping," *Environ. Econ. Policy Stud.*, **13**, 177-193 (2011).
 35. <https://www.iso.org/standard/37456.html> (accessed Jun. 2020).
 36. <https://www.iso.org/standard/38498.html> (accessed Jun. 2020).
 37. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/31932> (accessed Jun. 2020).
 38. <http://susa.or.kr/ko/content/solid-waste-management> (accessed Jun. 2020).
 39. National Institute of Environmental Research, "A Study in Life Cycle Assessment of Plastic Waste Recycling (I) - Domestic Wastes," NIER-RP2019-113 (2019).
 40. Korea Ministry of Environment, "Current Status of Recycling Market to Improve the Consumption of Recycled Products," KMoE report (2016).
 41. Sethurajan, M., van Hullebusch, E. D., Fontana, D., Akcil, A., Deveci, H., Batinic B., leal, J. P., Gashe, T. A., Kucuker, M. A., Kuchta, K., Neto, I.F.F., Soares, H.M.V.M., and Chmielarz, A., "Recent Advances on Hydrometallurgical Recovery of Critical and Precious Elements from End of Life Electronic Wastes - a Review," *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.*, **49**(3), 212-275 (2019).
 42. Choi, H.-J., Choi, Y., and Rhee, S.-W., "The Strategy for Management of Plastic Waste in Korea Through the Recycling Policy in Developed Countries," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **35**(8), 709-720 (2018).
 43. <https://www.sedaily.com/NewsView/1VN220AMGF> (accessed Jun. 2020).