

국내P 환경동향보고

전자폐기물 재활용을
통한 지구온난화
저감효과 연구 동향

전자폐기물 재활용을 통한 지구온난화 저감효과 연구 동향

- 배경
- 국내 연구동향
- 국외 연구동향



전자폐기물 재활용을 통한 지구온난화 저감효과 연구 동향

한국전자제품자원순환공제조합 연구개발팀
박지환

배경

지구온난화는 19세기 후반부터 시작된 전 세계적인 바다와 지표 부근 공기의 기온상승 현상을 의미한다. 21세기 초부터 지구 표면의 평균 온도는 1980년에 비해 약 3분의 2정도 증가한 약 0.8℃가 상승했다. 지구온난화에 대한 원인에 대해서는 대체적으로 두 가지 학설이 존재한다. 전자는 인간의 산업 활동에 의해 지구온난화가 발생·가속화되었다는 시각이며, 후자는 지구의 기후는 자체적으로 기온의 상승과 하강이 반복되므로 자연스러운 기후현상으로 보는 시각이다. 다만, 대부분의 과학자들은 전자의 시각에 동조하고 있으며, 온실기체 농도의 증가와 화석 연료의 사용과 같은 인간의 활동에 의해 발생한 것으로 추측하며, 이와 관련된 연구결과는 대부분의 국가 및 유명 연구기관에서 보편적으로 받아들여지고 있다.

지구온난화를 유발시키는 원인물질은 수백, 수천가지에 달한다. 사실상 모든 종류의 지구온난화 유발물질을 관리할 수 없기에 우리나라도 지구온난화 유발물질 6종을 대표적으로 선정하여 「대기환경보전법」을 통해 관리하고 있다. 더 엄밀히 말하자면, 「대기환경보전법」에서는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 온실가스로 규정하고, “적외선 복사열을 흡수하거나 다시 방출하여 온실효과를 유발하는 대기 중의 가스 상태 물질”로 정의하고 있다. 한편, 동법에서 기후·생태계변화 유발물질로 염화불화탄소(CFCs)와 수소염화불화탄소(HCFCs)를 규정하고, 이에 따라 해당 물질들은 법 테두리 안에서 관리하고 있다.

온실가스와 기후·생태계변화 유발물질에 대한 국제적 관리지침은 ‘몬트리올 의정서’에 의해서 처음 제정되었다. 1970년대 초, 지구 대기의 성층권의 CFC가

오존 분자들을 파괴할 수 있다는 연구결과가 발표되자 1978년 미국, 노르웨이, 스웨덴, 캐나다에서 염화불화탄소의 사용이 금지되었다. 1985년 남극 대륙 상공의 오존층에 구멍이 생겼음을 발견한 연구진들은 염화불화탄소의 규제가 국제연합 환경계획이 몬트리올 의정서를 재정하도록 촉진시켰다. 몬트리올 의정서에 따르면, 염화불화탄소, 수소염화불화탄소, 수소불화탄소냉매는 점차적으로 사용이 금지(Phase out)되거나 사용량을 줄여야(Phase down)하는 제한된 냉매물질이다.

최근 2016년 12월 ‘키갈리 개정서’가 채택됨으로서 선진국을 중심으로 수소불화탄소에 대한 규제의 논의도 구체적으로 실행되고 있다. 즉, 전 세계 국가들은 몬트리올 의정서에서 규제한 냉매물질은 반드시 저감(Phase down) 또는 전폐(Phase out)가 불가피하기에, 이를 대체하기 위한 대안(주로 자연냉매)수립이 시대적 흐름임을 이해하고 적극적인 대비 자세를 견지하고 있다. 국내도 키갈리 개정서에 의한 수소불화탄소 사용규제는 HFC(18종)을 대상으로 2024년부터 규제를 시작하여 2045년까지 완료 될 예정이며, 2045년 목표 감축량은 2024년 기준수량의 80%를 감축을 목표로 한다. 다만, 당장 HFC에 대한 사용규제가 전무하고 감축 완료 시점까지 약 20년의 시간이 존재하므로, ‘오존층보호법률’에 대한 구체적인 제·개정 움직임이 없다는 점은 아쉬움이 남는다. 또한, 친환경냉매(자연냉매) 등에 대한 연구개발 현황도 선진국에 비해서는 미미하다고 볼 수 있다.

<표 1> 몬트리올 의정서 이후 개정안 현황

분류	런던개정서	코펜하겐 개정서	몬트리올 개정서	북경 개정서	키갈리 개정서
채택일	'90.06.29	'92.11.25	'97.09.15	'99.12.03	'16.10.15
국내가입	'92.12.10	'94.12.02	'99.08.19	'04.01.09	-
국내발효	'93.03.10	'95.03.02	'99.11.19	'04.04.08	'24. (예정)

몬트리올 의정서(1989년 발효: CFC 5종, 할론 3종(총 8종 지정))가 지정된 이후, 현재까지 총 5회에 걸친 ‘개정서’를 통해 주요 냉매 물질인 염화불화탄소, 수소염화불화탄소에 대한 규제는 강화되었다. 앞서 언급한 대로, 가장 최근에 합의된 후속서는 2016년 10월 발의된 ‘키갈리 개정서’이며 의정서 내용에는 HFC냉매 18종에 대한 규제물질 신규추가 및 이행이 포함되었다. <표 1>

<표 2> 몬트리올 의정서 이후 개정안 주요 내용 (규제대상 냉매물질)

분류	개정서 세부내용 (규제물질)
런던 개정서 (‘90.06.29)	CFC 10종, 사염화탄소, 메틸클로로포름 추가지정 규제대상물질 총 20종으로 확대
코펜하겐 개정서 (‘92.11.25)	HCFC 40종, HBFC 34종, 메틸브로마이드 추가지정 규제대상물질 총 95종으로 확대
몬트리올 개정서 (‘97.09.15)	메틸브로마이드 규제일정 강화(선진국 2005년, 개도국 2015년 전폐) 2000년부터 규제물질에 대한 수출입 허가제도 시행
북경 개정서 (‘99.12.03)	BCM(브로모클로로메탄) 추가지정 규제대상물질 총 96종으로 확대
키갈리 개정서 (‘16.10.15)	HFC 18종 규제대상 물질 추가지정 △HFC-134a((이하 괄호는 GWP 지수, 1,430) △HFC-143(353) △HFC-245fa(1,030) △HFC-365mfc(794) △HFC-227ea(3,220) △HFC-236cb(1,340) △HFC-236ea(1,370) △HFC-236fa(9,810) △HFC-245ca(693) △HFC-43-10mee(1,640) △HFC-32(675) △HFC-125(3,500) △HFC-143a(4,470) △HFC-41(92) △HFC-152(53) △HFC-152a(124) △HFC-23(14,800)

온실가스과 기후·생태계변화 유발물질 가운데, 염화불화탄소와 수소염화불화탄소는 냉매(Refrigerant)물질로서 전기·전자제품에 광범위하게 사용되고 있다. 냉매란 냉동기에서 저온의 물체에서 열을 빼앗아 고온의 물체로 운반해주는 매체로서, 전기·전자제품에서는 냉장고, 에어컨, 제습기 등에 주로 사용된다. 전자제품 보급률이 점진적으로 높아지던 1990년 ~ 2000년대에 주로 사용된 냉매는 프레온 냉매로서, 탄소(C), 수소(H), 불소(F), 그리고 염소(Cl) 원소로 구성되며 각 원소의 유무에 따라 염화불화탄소, 수소불화탄소, 수소염화불화탄소로 구분한다. 사실, 현재까지도 수소염화불화탄소와 수소불화탄소는 냉장고, 정수기, 에어컨 등의 폐기단계에서 잔류냉매로서 발견된다. 좀 더 세부적으로 살펴보면, 냉장고와 전기정수기에 주로 사용된 냉매는 CFC-12(GWP: 10,890)에서 HFC-134A(GWP: 1,430)로 변화했는데, 이는 CFC계열 냉매의 높은 GWP로 인해 HFC냉매로의 변화(대체)가 국제사회에서 강력하게 권장되었기 때문이다. 최근에는 수소불화탄소의 대체 냉매로서 GWP가 0에 가까운 자연냉매(R600A)로의 전환도 활발하다. <표 2>

<표 3> 할로겐 화합물 냉매물질별 특성

분류	화학식	분자량	ODP ¹⁾	GWP ²⁾	용도
CFC-11	CCl ₃ F	137.37	1	4,750	· 대형에어컨 등, 현재생산금지
CFC-12	CCl ₂ F ₂	138.92	1	10,890	· 냉장고, 정수기 등, 현재생산금지
CFC-13	CCIF ₃	139.15	1	14,420	· 2원 냉동장치 초저온 냉매 (현재생산금지)
CFC-113	CCl ₂ FCCIF ₂	222.39	1	6,130	· 대용량 터보 냉동기, 현재생산금지
CFC-114	CCIF ₂ CCIF ₂	223.93	1	10,040	· 회전압축기, 크레인 등, 현재생산금지
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	102.03	0	1,430	· 냉장고, 자동차 에어컨 등 · (CFC-12 대체용) 교도협약 규제대상
HCFC-22	CHCLF ₂	142.48	.05	1,810	· 에어컨, 저온용 냉동장치 2030년부터 사용금지

에어컨의 경우, 에어컨 생산 초기에는 CFC-11(GWP: 4,750) 냉매가 주로 사용되었으며, HCFC-22(GWP: 1,810) 냉매로 전환된 후, 현재는 HFC-410A(GWP: 1,725) 냉매가 주로 사용되고 있다. 냉장고, 전기정수기와 마찬가지로, 전자제품에 주로 사용되는 대체냉매는 ODP와 GWP가 낮은 물질로 강력하게 대체되어지고 있다. 한편, 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률」에 명시되지 않아 법적관리품목에 해당하지 않는 “의류관리기”와 같은 새로운 형태의 가전제품에도 냉매가 주입되기 때문에 향후 법적 테두리 내에서 면밀하게 지구온난화유발물질을 관리·감독해야 할 것이다. <표 3>

「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률」에 따르면, 전자제품에 주입된 냉매물질은 폐기 및 재활용과정에서 적법하게 회수되어 폐가스류처리업자에게 인계되어야 한다. 이후, 폐가스류처리업자는 인수받은 냉매를 정제·재생 또는 파괴공정을 거쳐 적절하게 최종 처분하여야 한다. 즉, 냉매를 회수하는 재활용사업장과 최종처리자인 폐가스류처리업자 모두에게 막중한 의무가 뒤따른다.

1) 오존층파괴지수(Ozone Depletion Potential)

2) 지구온난화지수(Global Warming Potential)

마찬가지로, 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률」에 의해, 냉매물질은 각각의 종류별로 별도로 회수·분리되어 보관되어야 한다. 이를 위해, 일반적으로 재활용사업장에서는 각 냉매의 물리/화학적 특성과 사업장의 폐전자제품 처리능력(Capacity)을 종합하여, 적절한 규격의 냉매회수기를 제작하거나 구매하여 냉매를 회수 한 뒤, 별도로 분리·보관한다. <그림 1, 2>



[그림 1] 에어컨용 냉매회수기



[그림 2] 전기정수기용 냉매회수기

2019년 8월 3일을 기준으로, 산업통상자원부는 「고압가스안전관리기준통합고시」 일부개정(안)에 대한 행정예고를 발표하여, 「대기환경보전법」과 「고압가스 안전관리법」에서 중복 규제되고 있는 냉매회수기기 안의 고압가스에 대해서는 고압가스 범위에서 제외함을 원칙으로 하였으며, 그 조건으로 냉매정보 관리시스템 (<https://www.rims.or.kr>)에 등록된 「냉매회수기기 구조 및 성능기준에 관한 규정」을 준수한 냉매회수기를 이용할 때, 위해발생의 우려가 없다고 인정하였다. 이에 따라, 폐전기·전자제품으로부터 발생한 잔류냉매의 회수는 고압가스 관리 규제로부터 자유로워지므로, 잔류냉매를 회수할 수 있는 여건이 보다 안정되어 궁극적으로 지구온난화 저감 역할에도 크게 기여할 것으로 보인다.

●● 국내 연구 동향

폐전기·전자제품의 재활용을 통한 지구온난화 저감효과에 대한 연구는 물질흐름분석(Material Flow Analysis; MFA), 탄소발자국(Carbon Foot-print), 그리고 전과정평가(Life-Cycle Assessment; LCA) 연구 방법론이 발전함에 따라, 함께 발전된 양상을 보이고 있다.

물질흐름분석(MFA)이란, 특정 물질의 생산, 유통, 소비, 그리고 최종 폐기(처리/처분) 과정을 포함하여 각 단계별로 존재하는 물질의 양과 이동경로를 추적하여 자원순환 현황과 자원순환 형성의 저해하는 흐름이나 문제점을 파악하고, 최종적으로 이를 개선하기 위한 전략을 수립하기 위해 이용되는 연구방법론이다. 각 단계에 해당하는 자원의 수입/생산 및 사용/수출, 그리고 실제로 획득하기 어려운 자원의 획득 단계(추출/채굴) 등이 모두 포함되므로 신뢰도 높은 데이터를 확보하는 것이 가장 큰 문제점이자 어려움이다. 그럼에도 불구하고, 물질흐름분석 연구는 국가 단위에서 자원 및 재생산자원의 효율적 분배/운용을 위해 꾸준히 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 최근에는 특정 유해물질에 대해 분석하여, 잠재적 위해성을 최소화할 수 있는 전략수립에도 활용되고 있다.

탄소발자국(Carbon Foot-print)은 개인 또는 단체(집단 혹은 국가)가 직/간접적으로 발생시키는 온실기체(지구온난화 유발물질)의 총량을 산출하는 연구를 의미한다. 즉, 일상생활 및 산업 활동에서 사용하는 연료, 전기, 기계장치 등이 모두 포함된다. 즉, 탄소발자국은 지구온난화를 유발하고 있는 현황 또는 잠재적 미래에 대해 진단하고, 저감 방안을 마련하기 위한 연구이다. 물질흐름분석 연구 자체와는 다른 의미지만, 기본적으로 물질흐름분석이 전제됨으로써 각 주체별로 자원 또는 화석연료의 사용량이 명확히 산출 될 때, 그 신뢰성이 담보된다고 할 수 있다. 국내에서는 한국환경산업기술원에서 탄소발자국 제도에 대해 운영·관리하고 있으며, 일상 생활용품, 가정용 전자기기 등 모든 제품의 탄소배출량 정보를 공개하고 저탄소 제품의 인증을 통해 시장주도의 저탄소 소비문화 확산에 기여하고 있다.

전과정평가(LCA)는 제품 또는 특정 시스템의 모든 과정인 원료채취 단계, 가공,

대기 및 수(가공)조립, 수송, 사용, 폐기의 모든 과정에 걸쳐 에너지와 광물자원의 사용과 이로 인한 수계(Watershed), 토양(Soil)으로의 환경 부하량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 악영향을 규명하고, 환경부하가 환경에 미치는 영향을 평가하여, 이를 저감 및 개선하고자 하는 연구 방법론이다. 즉, 전과정평가의 장점은 단순한 제품부터 어떠한 시스템까지 연구범위를 자유롭게 확장시킬 수 있으며, 탄소발자국에서 활용한 온실기체의 발생에 따른 지구온난화 기여도뿐만 아니라, 에너지의 소비 및 인간/동물·식물의 건강, 생태학적 영향까지를 전반적으로 고려할 수 있다. 이렇듯, 물질흐름분석, 탄소발자국, 그리고 전과정평가의 연구가 점차 발달하고 추정된 자원 및 온실기체 발생량이 정확도가 높아짐에 따라, 전자폐기물과 같은 ‘응용영역’에서의 연구가 활발하게 발달한 것으로 볼 수 있다.

다만, 엄밀히 지구온난화 유발 및 저감효과는 탄소발자국과 전과정평가 연구를 통해 실증적으로 추정 할 수 있는데, 이러한 연구기법이 전자폐기물에 대한 주제를 중심으로만 발전한 것은 아니다. 이러한 연구는 건축물, 교통수단(자동차, 선박 등), 그리고 생활계(고형)폐기물 등에 좀 더 초점을 두고 연구가 활발하게 진행되었으며, 이에 따라 전자폐기물에 대한 연구가 중점적으로 연구되었다고 보기는 어렵다. 한편, 전자폐기물과는 다르게, (신규)전자제품에 대해서는 전과정평가 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 미국이나 유럽연합 등 선진국에 국내 전자제품을 수출하기 위해서는 유해물질 사용에 대한 기준 준수여부 및 전과정평가를 통한 환경성 데이터의 공개가 필요하기 때문이다. 특히, 유럽위원회(EC)는 EU 환경발자국 제도 도입을 위해 제품/조직 환경발자국 검증제도의 제도화 준비하고 있으며 이에 따라, 향후 EU에 전자제품 수출을 위해서는 전과정(Life Cycles) 동안 발생하는 환경영향을 정량화하는 데이터를 구축해야 하므로, 이에 대한 연구는 활발하다고 볼 수 있습니다.

구체적으로 폐전기·전자제품의 지구온난화 저감효과에 대한 연구들을 살펴보면, 크게 두 가지 방식의 연구로 분류된다. 첫째는 다양한 전자제품에 대한 동시다발적 연구가 어려우므로 단일 전자제품 또는 구성 재질 및 특성이 유사한 2~3개의 제품을 선정하여 제품 선정을 기반으로 한 연구사례이다. 이와는 반대로 재활용 공정 중 특정 단위공정(Unit-process)을 대상으로 하여, 다양한 전자제품이 재활용될 때

온실기체의 발생량 또는 저감량을 분석한 연구 방식을 채택하고 있다.

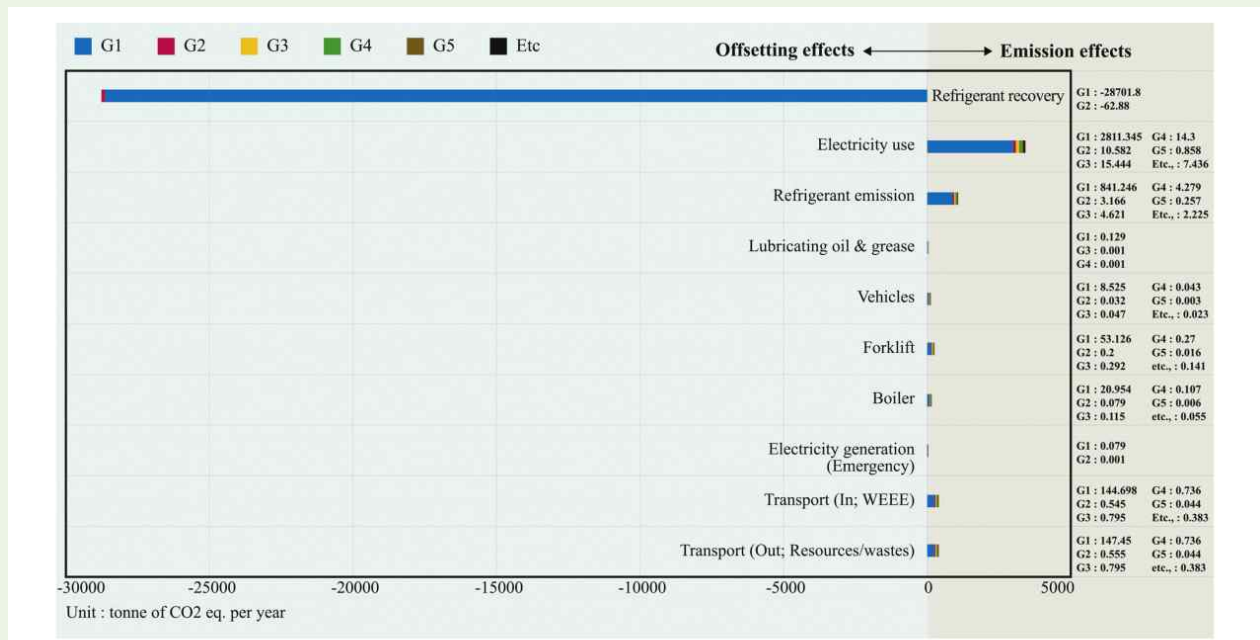
Choi, Byung-Chul et, al.,(2006)은 전자제품 중 개인용컴퓨터(Personal Computer; PC)를 대상으로 전과정평가 연구를 진행하여, 지구온난화(Global warming) 영향을 분석 하였으며, 그 외에도 인간/동식물 및 생태학적 요건과 환경 부하량을 산출하였다. 연구범위는 PC의 제조 및 재활용분야를 모두 포함시켰으며, PC는 재활용을 통해 오존층파괴와 생태독성 가능성을 제외한 모든 환경 부하를 저감시키는 것으로 분석하였다. 특히 PC는 앞서 소개한 지구온난화 유발물질을 전혀 포함하고 있지 않음에도 불구하고, 일반 재활용 공정만으로도 지구온난화 저감효과를 비롯한 환경부하를 저감시키는 것으로 나타나, PC 재활용 공정이 지구 온난화 저감 및 환경부하 감소에 대한 공헌도가 매우 크다는 점을 암시하였다. 한편, 저자는 추가적으로 PC재활용이 타 단계의 환경부하를 줄이는 데 도움을 주기 위해서는 최대 63%까지 재활용 성과를 증대시킬 것을 제안하였다.

최우진 등(2016)은 폐전기·전자제품 중 소형가전으로 분류되는 제품에 대해 재활용 공정 중 회수(선별) 공정에 대한 전과정평가를 연구하였다. 재활용 공정에 적용된 단위공정은 ‘1차 파쇄’, ‘수작업 분해’, ‘자력선별’, ‘2차 파쇄’, ‘입도선별’, ‘와전류 선별’ 및 ‘근적외선 선별’ 등으로 구성되어 있다. 약 15톤/일의 처리규모에서 유용자원을 선별/회수할 경우 지구온난화(GWP)는 약 8.60E+00 kg CO₂-eq/ton으로 분석되었다. 즉, 지구온난화(GWP)에 대한 환경영향이 전체 환경영향의 약 57.1 %를 차지하는 것으로 나타나 그 중요도가 매우 높은 것으로 분석되었다. 한편, 경제성 분석을 통해 CO₂ 저감량을 환산 할 경우, 연간 약 213,225천원의 경제적 효과가 발생하는 것으로 분석하였다. <표 4>

<표 4> 주요 연구결과 (최우진 등 (2016))

구분	GWP 제한요인	환경영향	경제적 효과
주요결과	ABS 플라스틱 (환경부하의 51.41%)	-2.78E+03 (kg CO ₂ -eq/ton)	213,225 천원/년

Park, Jihwan et, al.,(2019)은 탄소발자국 개념을 국내 재활용 사업장에 적용하여, 실제 폐전기·전자제품 재활용 공정에 대한 지구온난화 저감효과를 분석하였다. 연구대상은 「전기·전자제품 및 자동차의 자원순환에 관한 법률」에서 규정하는 27개 품목을 모두 재활용 할 수 있는 사업장을 대상으로 선정하고, 1년 동안(2016년) 재활용된 물질을 물질흐름분석을 통해 분류하였다. 이후, 동 기간 동안 재활용 활동에 소비된 전기, 화석연료량을 CO₂-equivalent로 환산하여 CO₂ 발생량(Emission)을 산정하고, 반대로 제품 내 잔류한 냉매 회수량을 측정하여 CO₂ 상쇄효과(Offsetting)를 분석하였다. 연구결과, 2016년 한해에 폐전기·전자제품 운송(입고/출고) 및 재활용 과정에서 약 4,097 CO₂-eq ton/yr 을 발생시켰으며, 반대로 약 5.1톤의 액상 냉매 회수를 통해 약 28,770 CO₂-eq ton/yr의 상쇄효과가 나타났다. 즉, 연간 지구온난화 상쇄효과가 배출효과보다 약 7.02배 많은 것으로 나타났다 <그림 3>. 살펴본 연구들을 통해, 폐전기·전자제품의 재활용 공정이 지구온난화를 저감시키는 중요한 공정임을 확인 할 수 있으며, 그 근거로는 냉매회수를 통한 CO₂ 상쇄효과, 재생물질 사용으로 인한 자원 및 에너지 절감, 그리고 신재(채굴/유통) 개발에 따른 CO₂ 발생량 저감효과 등이 주된 근거로 작용한다.



[그림 3] 주요 연구결과 (Park et, al.,(2019))

●● 국외 연구 동향

앞서 언급한 바와 같이, 국외의 다양한 연구에서도 폐전기·전자제품의 재활용을 통한 정확한 지구온난화 저감효과 분석은 부분적으로 이루어지고 있다. 즉, 특정 제품을 선정하여 전과정평가 기법을 이용하여 분석하거나, 특정 재활용 관련 공정을 선정하여 부분적으로 분석한 연구가 활발하다. 본 보고서에서는 인접 국가인 중국과 일본의 연구사례를 간략히 살펴보고, 국제적인 연구동향은 어떠한지 살펴본다. 먼저, 중국의 경우 전자폐기물 적정 처리와 관리에 대한 관심이 급격하게 증가하면서 관련 연구논문이 활발하게 게재되고 있다. 중국의 폐가전 재활용 및 지구온난화 저감효과에 대한 연구는 실제 연구진에 의해 조사된 데이터(Actual survey)와 제도권 내 해체/분해공장에서 제공하는 데이터(Licensed disassembling plant)를 주로 이용하는 것으로 나타났다.

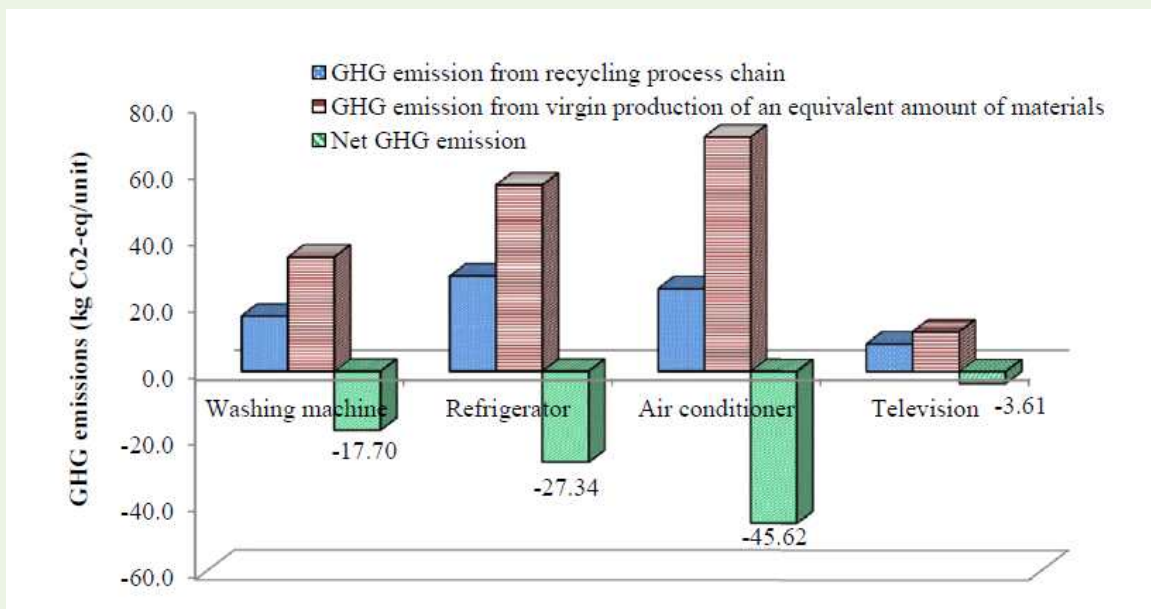
Song, Xiaolong et, al., (2018)은 중국 내 전자폐기물 중 CRT TV 품목에 대해 전과정평가 방법을 통해 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 추정을 실시하였다. 연구의 특이점은 중국의 CRT TV 처리수준을 시나리오별로 구분하여 (1)중국의 실제 처리 수준, (2) 중국의 WEEE 처리 지침을 반영한 처리 수준, 그리고 (3) 기술 발전에 따른 처리수준 으로 나누어 각각 분석하였다. 위의 각 시나리오에 따른 온실가스 배출 저감량은 각각 19.59, 20.43, 25.82 kg CO₂-eq 으로 산정하였다. 결국, 중국의 CRT TV에 대한 현재의 처리(재활용) 수준에서도 온실가스 저감 효과는 발휘되고 있으며, 이를 더욱 극대화하기 위해서는 중국 내 WEEE 처리 지침과 기술수준을 더욱 향상시킬 필요성이 높은 것을 확인할 수 있다.

Yang, Haichao, et, al.,(2020)은 폐전기·전자제품 재활용을 통해 신재(채굴/유통) 개발 및 신제품의 운송으로 인해 과생되는 지구온난화 저감효과를 예측하고, 지구온난화 저감효과를 분석하였다. 자료포락분석(Data Envelopment Analysis; DEA)의 방향거리함수(Direction Distance Function; DDF)³⁾을 이용하여 전자폐기물 배출 감소 편익 및 효율을 평가하였다. 연구결과에 따르면, 2013년부터 2017년까지 중국 전자폐기물 29개의 자치구의 총 배출량 감소효과는 63억4000만

3) 주제 또는 시스템에 대해 생산 및 효율성을 추정하는 데 사용되는 연구기법으로서, 최적화 기법에 속한다.

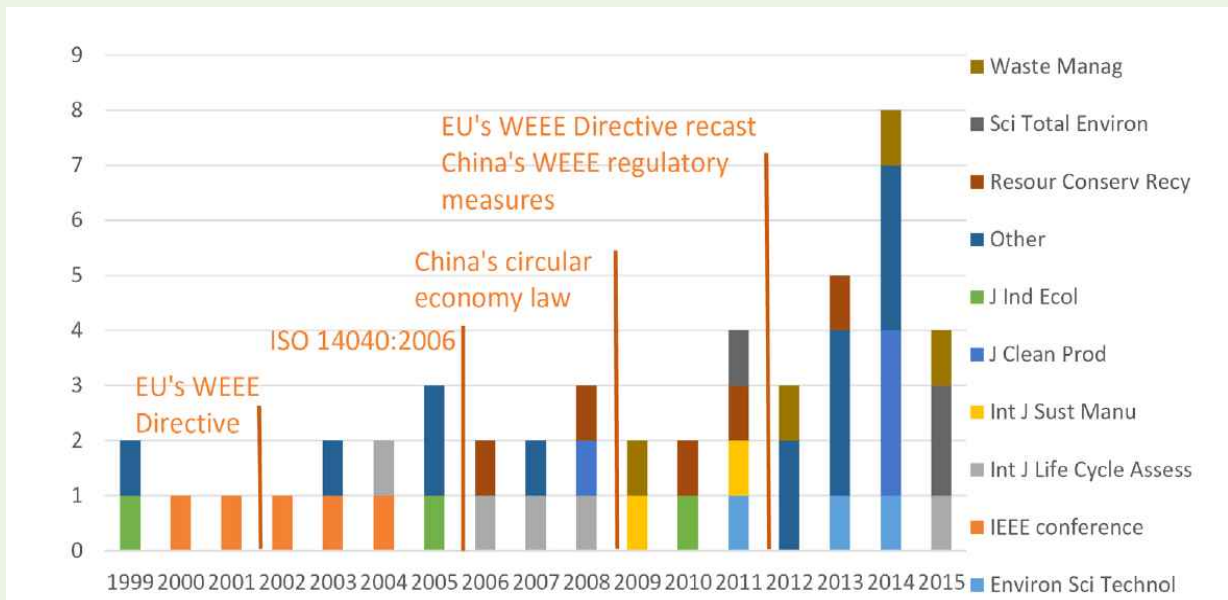
위안(=약 1조 700억)이었으며 평균 배출량 감소효율은 0.88이었다. CO₂의 배출 감소 편익은 3억 9천만 톤이었고, 평균 배출 감소 효율은 0.82로 나타났다. 수질 오염 감소 혜택(폐수 배출량 저감)은 5억7000만 위안(=약 960억), 평균 효율은 0.9위안으로 나타났다. 고체 폐기물과 SO₂의 배출 감소효과는 각각 53억7000만 위안(=약 9,000억)과 4억 위안(=약 670억)이며, 같은 배출 감소효율은 0.89이다. 위 연구에서는 잠재적 전자폐기물 발생량을 고려하여 재활용을 통한 편익분석을 실시했다는 점에서 의의가 있다. 전자폐기물 재활용 산업은 여전히 경제적/환경적으로 중국의 지속가능성 확보를 위한 유용한 연구주제로 볼 수 있다.

일본의 연구사례를 살펴보면, Menikpura, SNMS NM et, al.,(2014)은 세탁기, 냉장고, 에어컨, 텔레비전(4개 품목)을 선정하여 전과정평가 분석을 통해 지구 온난화 저감효과 분석을 실시하였다. 일본 내 폐가전 처리지침을 기준으로 한 재활용 공정을 기반으로, 폐제품의 운송, 재활용, 그리고 신재(채굴/유통) 개발 회피를 통한 온실기체 저감량을 정량적으로 분석하였다. 연구결과에 따르면, 세탁기, 냉장고, 에어컨, 그리고 텔레비전의 제품 단위 중량을 재활용할 때, 각각 17.70, 27.34, 45.62 그리고 3.61 kg CO₂-eq의 온실기체 저감효과가 발생하는 것으로 조사되었다 <그림 4>.



[그림 4] 주요 연구결과 (Menikpura, SNMS NM et, al.,(2014))

전 세계적으로 지구온난화 저감효과 즉, 전과정평가 방법론을 적용한 총 47편의 연구논문을 분석한 결과, 1999년부터 2015년 사이에 발간된 연구논문은 유럽 연합(EU)의 전자폐기물 관리지침(WEEE Directive)과 중국의 전자폐기물 규제(WEEE Regulatory measures)가 실시된 시기의 시간 흐름에 따라 활발한 연구가 진행 된 것으로 판단하였다 Rodriguez-Garcia, G and M. Weil. (2016).



[그림 5] 전자폐기물에 대한 전과정평가 연구동향 (Rodriguez-Garcia and M. Weil. (2016))

국제적으로 저명한 학술지를 대상으로 ‘15년을 최신 기준으로 가정할 때, 전자 폐기물 전과정평가 학술논문은 단일 학술지로는 “Journal of cleaner Production”에 가장 활발하게 게재된 것으로 나타난다. <표 6>



<표 5> 국가별 전자폐기물에 대한 전과정평가 연구동향 (Rodriguez-Garcia and M. Weil. (2016))

국가	게재 수	국가	게재 수	국가	게재 수
이탈리아	8	영국	4	타이완 오스트리아 한국 벨기에 네덜란드 스웨덴	각 1편
중국	7	다 국가	3		
유럽연합	5	스위스	2		
일본	5	오스트레일리아	2		
미국	4	브라질	2		

49편의 연구논문 중 정책에 집중된 2편의 연구논문을 제외하고, 각각의 전과정평가연구가 어떠한 세부적인 연구 범위(Systematical boundary)를 갖는지 조사한 결과, 폐기물관리(Waste Management) 특히 재활용(Recycling) 단계의 연구가 가장 활발한 것으로 나타났다. 즉, 실제로 전과정평가 연구를 진행하면서 전자폐기물에 대한 전생애주기를 관찰하고자 노력하지만, 실제 연구에서 전생애주기에 해당하는 관련 데이터를 확보하는 것은 매우 어려우므로, 약 6.4%의 연구만이 전자폐기물의 전생애주기를 포괄하여 분석하였다. <그림 5>



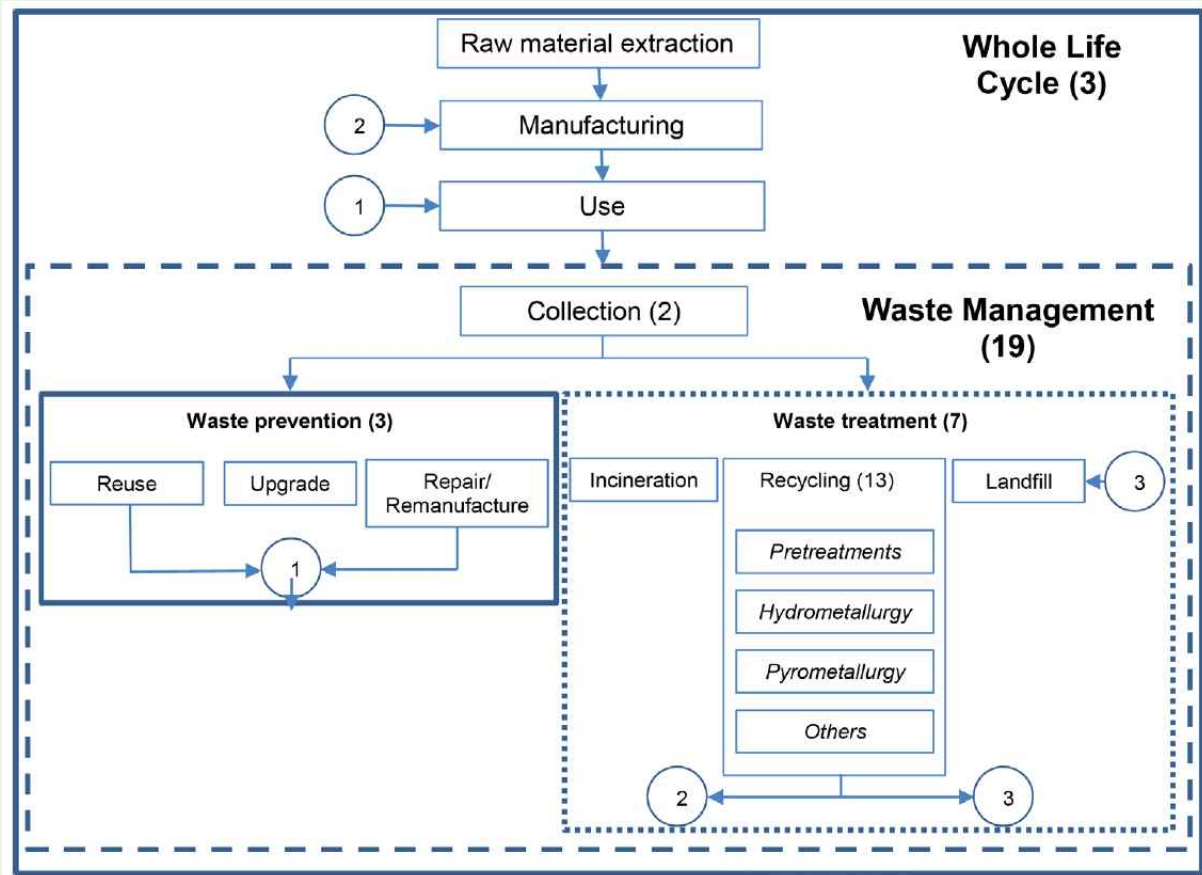


그림 5. 연구범위 기반 전과정평가 연구동향 (Rodriguez-Garcia and M. Weil. (2016))

한편, 전자폐기물 중 연구대상이 된 제품에 대해 조사한 결과, 단일제품이 아닌 2~6개 (Various)의 제품들을 동시에 분석한 연구가 14편(약 29.8%)으로 가장 많았고, 뒤를 이어 정의되지 않은 WEEE (Unspecified WEEE)이 6편(12.7%), 콤프레셔, 컴퓨터, CRT, CRT 유리, 그리고 PCB기판이 각각 3편(6.4%)으로 조사되었다. 마지막으로, 휴대전화, TV, LCD가 각각 2편(4.3%), 그리고 안테나, 식기세척기, 전동기, LED램프, 프린터, 세탁기가 각각 1편(2.1%)로 나타났다.

<표 6>

표 6. 품목별 전과정평가 연구동향 (Rodriguez-Garcia and M. Weil. (2016))

국가	게재 수	국가	게재 수
복수 제품 (Various)	14	컴프레서, 컴퓨터, CRT, CRT유리, PCB기판,	15 (각 3)
미정의/비대상 (Unspecified WEEE)	6	휴대전화, LCD, TV	6 (각 2)
안테나, 식기세척기, 전동기, LED램프, 프린터, 세탁기			6 (각 1)

전 세계적으로, 폐전기·전자제품의 재활용을 통한 지구온난화 저감효과에 대해 연구된 사례를 분석한 결과, 실질적으로 전과정평가를 이용한 Global Warming Potential (GWP) 계산이 가장 유용하고 보편적으로 이용되는 연구방법론으로 조사되었다. 다만, 전과정평가 방법론을 이용하더라도, 전자폐기물의 지구온난화 저감효과를 완벽하게 분석하는 것은 연구범위 설정의 한계성으로 인한 데이터 확보가 실질적으로 어렵기 때문에 복잡성과 한계성이 존재한다고 볼 수 있다.

환경적 관점에서, 제품의 사용 단계는 생산과 폐기 단계보다 상대적으로 환경적 부담을 덜 준다. 그러나 일단 전자제품이 폐기되면, 수거와 운송보다 최종적인 처리에서 환경적 부담이 가중된다(수질 및 대기오염). 그러므로 환경적 측면에서는 폐기물 처리보다 폐기물 방지(재사용, 수리, 재제조)가 더 유의할 수 있다고 제안하는 시각도 꽤 많은 것으로 나타난다. 한편, 전자폐기물의 재활용은 소각이나 매립보다 지구온난화 저감효과가 크기 때문에 되도록 재활용을 권장하는 것으로 조사되었다.

마지막으로, 전자폐기물은 지구온난화 유발물질(냉매) 외에도 여러 유해물질(중금속, 브롬화난연재 등)이 포함되어 환경적 접근이 매우 중요하다. 다만, 환경규제에 있어서 경제적, 사회적 측면을 고려하지 않을 수 없으므로 친환경적 기술, 환경, 사람들이 상호작용을 통해 지속가능성을 열어갈 수 있도록 열린 시각을 가지고 지구의 지속가능성을 염두하며 협력적으로 대응해 나가야 할 것이다.

<참고문헌>

1. Kirby, A. "Science academies back Kyoto." BBC News (2001).
2. IPCC, Synthesis Report , Section 2.4: Attribution of climate change, in IPCC AR4 SYR 2007.
3. 산업통상자원부, 산업통상자원부공고 제2019 - 465호 (2019. 8. 3)
4. 한국환경산업기술원, 탄소발자국: <http://www.epd.or.kr/epd/carbonIntro.do>
5. Roger B. D(2006), "Life Cycle Assesment : PRINCIPLE AND PRACTICE" , Scientific Applications International Corporation (2006)
6. Choi, Byung-Chul, et al. "Life cycle assessment of a personal computer and its effective recycling rate (7 pp)." The International Journal of Life Cycle Assessment 11.2 (2006): 122-128.
7. 최우진, 박은규, 박기학. "폐소형가전 선별·회수 공정의 전과정평가 연구." 한국전과정평가학회지 17.1 (2016): 103-112.
8. Park, Jihwan, et al. "Greenhouse gas emission offsetting by refrigerant recovery from WEEE: A case study on a WEEE recycling plant in Korea." Resources, Conservation and Recycling 142 (2019): 167-176.
9. Song, Xiaolong, et al. "Life-cycle energy use and GHG emissions of waste television treatment system in China." Resources, Conservation and Recycling 128 (2018): 470-478.
10. Yang, Haichao, et al. "Emission reduction benefits and efficiency of e-waste recycling in China." Waste Management 102 (2020): 541-549.
11. Menikpura, SNMS NM, Atsushi Santo, and Yasuhiko Hotta. "Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan." Journal of cleaner production 74 (2014): 183-190.
12. Rodriguez-Garcia, G., and M. Weil. "Life cycle Assessment in WEEE Recycling." WEEE Recycling. Elsevier, 2016. 177-207.



국내IP
환경동향보고