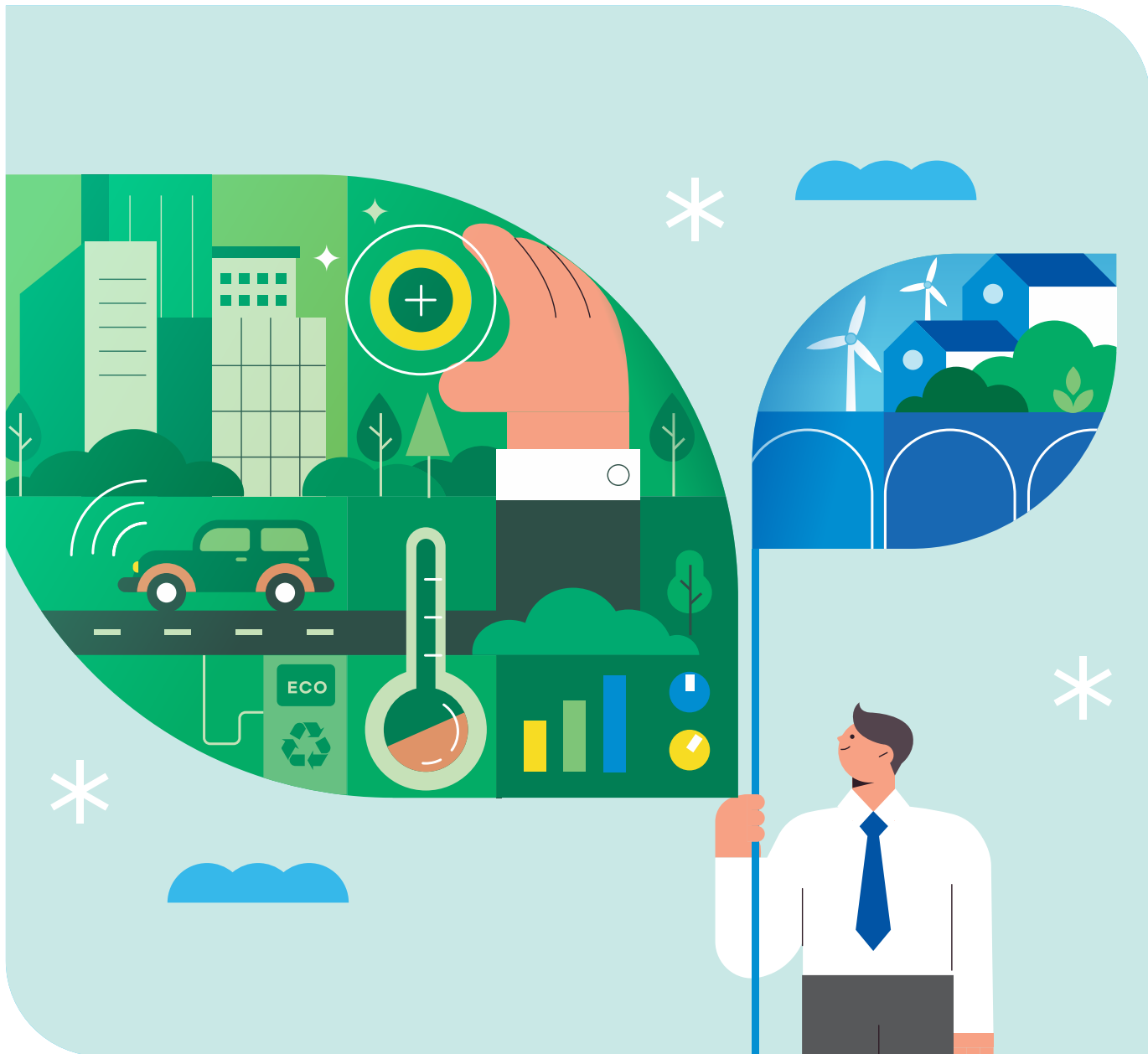
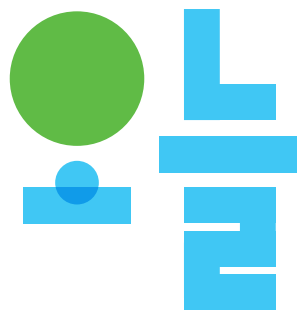


경남탄소중립

경상남도탄소중립지원센터



「경상남도 탄소중립 오늘」은 전 세계적인 이슈인 이상 기후변화와 이에 따른 다양한 분야에서의 탄소중립 정책 동향, 기술 및 산업 동향 등 정보를 제공하고, 경남도의 기후변화 및 탄소중립 현안 등을 분석하여 도민에게 정보를 제공 하고자 합니다.

순환경제 기반의 폐기물 재활용을 위한 디지털 정보체계의 역할 (플라스틱폐기물 중심으로)

01 선형경제에서 순환경제로

02 순환경제의 이론적 구조와 디지털 정보체계 연결

03 결론

2024.
Vol 01



순환경제 기반의 폐기물 재활용을 위한 디지털 정보체계의 역할 [플라스틱폐기물 중심으로]

김정빈 (수퍼빈(주) 대표)

선형경제 기반의 재활용과 순환경제 기반의 재활용은 그 목적이 다르다.

선형경제 기반의 재활용은 소각과 매립의 과부하를 줄이는데 목적이 있다면,

순환경제 기반의 재활용은 소재산업이 재생원료로 신재를 대체하도록 하는데 그 목적이 있다.

최근 포장재산업, 전자제품산업, 자동차산업 등에서 사용되기 위한 재생원료는

PET 등 플라스틱에서 다양한 소재로 확대되고 있으며,

이러한 재생원료 수급 문제는 무역장벽으로까지 확대되고 있다.

순환경제 기반의 재생원료 사업의 급격한 변화 속에서 인공지능과 사물간인터넷 등의

기술이 우리 재활용 방식을 어떻게 변화시키는지 살펴보고자 한다.



1 선형경제에서 순환경제로

산업혁명 이후 우리 인류사회는 선형경제 구조를 발전시켜 왔다. 선형경제 구조는 생산-소비-처분으로 구성된 경제사회구조를 의미한다. 우리는 생산-소비-처분의 구조가 지속가능할 것으로 기대했었지만 십 수년 전부터 우리 인류의 편리함과 풍요로움의 부산물인 쓰레기의 처분 총량이 한계점에 도달하면서 선형경제 구조의 끝에 직면하게 되었다.

우리나라에서도 2025년 사용이 종료되는 수도권매립지 대안을 찾지 못해서 화성시 그린환경 센터의 경우, 처리단가 2021년 12만 9천원에서 2023년 16만 9천원으로 3년만에 t당 31.0% 증가 하고 있으며, 각 지자체들은 발생지 원칙을 지키기 위해서 재활용의 비중을 높이려고 많은 재원을 투입하고 있지만 사실상 재활용율은 오히려 감소하거나 정체되고 있는 상황이다. 특히, 우리나라는 그 동안 중국에 대한 재활용품 수출 의존도가 매우 높았는데 2017년과 2018년 중국이 2차례에 걸쳐 56종의 재활용품 수입을 금지하면서 더욱 어려운 상황에 직면하게 되었다.

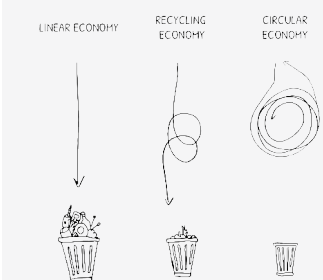
국제사회는 15-20년 전부터 UN을 필두로 SDG 17개 아젠다의 제정과 선포, EU의 그린뉴딜 정책 등을 정비하고 발표하면서 우리 인류사회의 경제구조를 선형경제에서 순환경제로 급진적인 전환을 준비해서 시도하고 있다. 예를 들어 2025년부터 유럽은 모든 음료용 포장재에 25%의 재생원료를 의무적으로 사용하도록 법제화했으며, 이 과정에서 Food Grade(식음료용 재생소재)라는 새로운 산업적 규격을 설정하며 재생원료의 표준을 이끌게 된다. 또한, 2026년부터 유럽향 완성차는 재생원료를 30% 이상 사용해서 제작되어야 하며, 이 중 5%는 반드시 폐차에서 나온 재생원료이어야 한다.

순환경제의 도래는 정책과 제도에 새로운 재활용의 개념도 반영하고 있는데, 예를 들면 재활용품을 PCR(Post Consumer Recycled, 소비자가 사용한 재활용품)과 PIR(Post Industrial Recycled, 산업현장에서 나오는 재활용품)로 구분하는 것이다. 과거에는 공장에서 나오는 스크랩(생산 공정에서 사용 후 남은 잔존물)도 재활용품이라고 정의했으나 이제는 PIR이라는 개념으로 PCR과 구분하고 있으며, 순환경제는 PCR의 소재화에 많은 중심을 두고 움직이고 있다.

결국은 선형경제가 정의하는 “사용 후 버려지는 제품으로 가공하는 원자재”라는 소극적인 재활용의 정의가 순환경제에서는 “기업들이 산업용 소재로 부가가치를 내기 위해 사용할 수 있는 원자재”로 재정의되고 있다.

이렇게 순환경제의 영향력이 확대되고, 재활용의 정의가 새롭게 정의되면서 우리 사회는 기존의 선형경제 방식의 재활용을 넘어서는 새로운 순환경제를 받아들이기 위한 전 방위적인 변화를 요구 받고 있다.

그림1 선형경제, 재활용, 그리고 순환경제 개념



자료) Circular Flanders

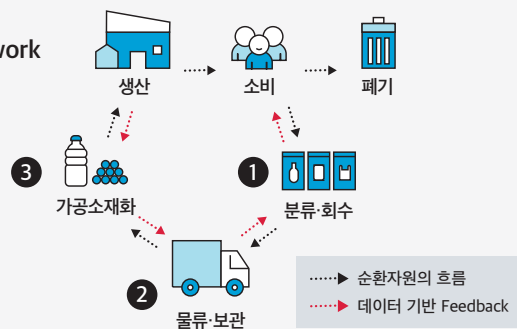
2 순환경제의 이론적 구조와 디지털 정보체계 연결

2-1 순환경제의 이론적 구조

순환경제의 재활용은 석유화학회사, 제지회사, 철강회사 등 소재회사들이 재생원료를 산업규격에 맞춰서 공급받을 수 있어야 한다는 관점에서 시작한다. 즉, 버려지는 많은 것들을 잘 분류하자가 아니라 산업 내 생산자가 비용을 지불해서 구매할 의향이 있는 재활용품이어야 하며, 이 재활용품으로 만들어지는 재생원료는 제품 생산에서 신재(Virgin)와 혼합사용하거나 신재를 대체할 수 있어야 한다.

이러한 관점에서 현재 순환경제 기반의 재생원료 범위가 우리의 기대와는 달리 매우 협소한 것이 사실이다. 하지만 작은 범위의 재생원료부터라도 산업이 수요하기 위한 산업적 규격(우리나라의 경우 KS)과 공급방식이 정비된다면 그 후 다른 재생원료로의 확장은 더욱 용이할 수 있다. 이러한 관점에서 우리나라 환경부와 식약처도 식음료용 포장재 의무사용 재생원료에 대한 KS 규격과 생산방식을 정비해서 발표했으며 이후 산업은 이러한 규격에 맞춰 재생원료 생산시설 투자와 재생원료 수집방식의 선진화를 만들어가고 있다.(환경부 보도자료(2024. 7.5) 무색 페트병 재생원료 사용 늘린다... 먹는물·음료 업계와 협약, 먹는물과 음료 페트병에 국내 발생 폐플라스틱 재생원료 10% 이상 사용)

그림2 순환경제의 이론적 Framework



자료) 수퍼빈 제공 자료

따라서 순환경제는 현재 선형경제 방식의 처분 단계인 폐기 단계 전에 소비자들로부터 산업용 소재로 취급이 가능한 재활용품(PCR: Post Consumer Recycled)을 선별수집하는 기준을 수립하고, 이러한 규격과 범위 내 수집된 재활용품을 혼입과 오염이 방지될 수 있도록 유통과 보관하는 프로세스를 통해서 필요한 전처리 과정 후 생산자 즉 기업에게 판매하거나 제공한다 것이다. 여기에서 선형경제의 핵심인 재활용선별장의 역할을 배제하는 이유는 일반적으로 재활용선별장의 역할이 폐기 단계에 가깝게 위치되어 있기 때문이다. 물론 사례별로 재활용선별장이 순환경제에 필요한 재활용품을 선별하는 기능도 충분히 있을 수 있지만 최근 제도화되고 있는

식음료용 재생원료 의무화의 대상인 재활용품은 재활용선별장에서 선별되는 PET병 등을 제외하는 것을 원칙으로 하고 있다.

정리한다면 **순환경제 기반 재활용의 이론적 구조**는 ❶ (분류와 회수) 소비자가 폐기 전 단계에서 ‘산업이 필요로 하며 규격과 표준에 맞는’ 재활용품을 선별 배출하고, ❷ (물류와 보관) 선별된 재활용품 별로 혼입과 오염을 방지하며 재생원료 생산 공정인 재생원료 가공공장(선형경제의 재활용 공장)까지 이동하고, ❸ (가공소재화) 마지막으로 재생원료 가공공장은 재생원료 구매자에게 재생원료에 대한 성분표 등 화학적·물질적 품질을 제시할 수 있어야 하며, 구매자가 요구하거나 동의하는 표준 공정을 수립해서 운영할 수 있어야 한다.

2-2 순환경제의 이론적 구조 중 “①분류와 회수”

순환경제의 이론적 구조 중 첫 번째 단계는 분류와 회수이다. 지금까지 선형경제의 분리수거 체계는 최대한 많은 종류의 재활용품을 구별해 배출하는 것을 목적으로 한다. 이는 이렇게 분리 배출되는 재활용품을 재활용된다면 그 양만큼 소각이나 매립 폐기물이 줄기 때문이다. 물론 이렇게 분리배출된 재활용품 중 상당량이 결국은 다시 소각이나 매립장으로 향한다는 것은 불편한 현실이다. 즉, 선형경제에서의 분류와 회수 목적은 소각과 매립을 줄이고자 하는 분리배출이 아니라 재생원료 수요자(기업) 중심의 선별배출 방식이 필요하다는 의미이다.

그렇다면 이 단계의 핵심은 기업이 수요하고자 하는 재활용품을 폐기물 중에서 어떻게 선별 하느냐이고, 또 더 나아가 기업의 순환자원 가공기술이 발전할수록 또는 기업의 재생원료에 대한 요구사항이 변화할 때 이를 반영하여 재활용품을 선별하고 수집할 수 있는가에 핵심이 있다. 바로 이러한 단계에서 인공지능(AI), FinTech 등의 기술과 디지털 정보체계가 중요한 역할을 할 수 있다.

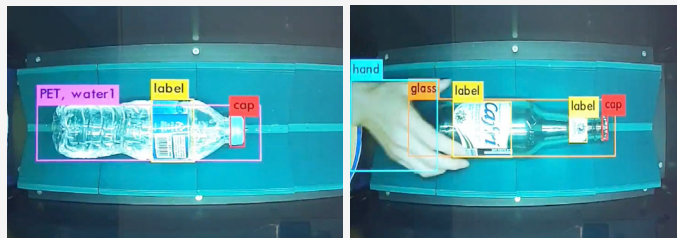
우리가 재활용품을 선별하는 판독의 기준은 인간의 시각정보에 절대적으로 의존하고 있다. 이를 효과적으로 대체할 수 있는 기술이 AI의 Vision 기술이다. 즉, 머신러닝 기법으로 다양한 재활용품의 형상을 인식하고 판독하도록 훈련된 AI Vision 기술은 인간의 노동력을 대신해서 다양한 재활용품을 인식하고 선별할 수 있다. 이 기술은 어떤 재활용품이 재생원료의 대상이고, 어떤 재활용품은 대상이 될 수 없는지 표준화해서 적용할 수 있으며, 이 표준 범위에서 재활용품을 선별 하게 된다. 이러한 표준범위의 설정은 우리 개개인이 분리배출할 때 개인 간의 판단으로 발생하는 오차의 범위를 최소화할 수 있으며, 오차 최소화는 결국 균일한 소재 대상을 선별했다는 것을 의미한다.

그림3 고흥군(좌)과 창원시(우) 재활용선별장 작업 모습



자료) 수퍼빈 제공 자료

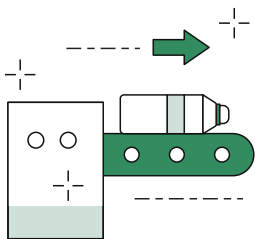
그림4 컴퓨터 비전 기반의 인공지능 선별 결과 예시



자료) 수퍼빈 제공 자료

또한, 우리가 배출하는 많은 재활용품은 생산 당시에 복합소재 사용 등으로 재활용되기 어려운 상태이다. 재활용을 위해서는 이러한 복합소재가 사용된 포장재나 제품 등을 적절하게 분리를 해야 하는데 이러한 간섭이 배출단계에서 진행되지 않으면 사실상 불가능하다. 여기에 디지털 정보체계의 또 다른 역할이 있다.

최근 전국적으로 보급되고 있는 무인자원회수기를 예로 들면 페트병을 분리배출해서 무인자원회수기에 투입하는 과정에 라벨을 제거하도록 유도하고, 라벨을 제거한 행위에 대해서 경제적 보상을 하는 핀테크 기술을 적용하고 있다. 이렇게 디지털 장비들은 재활용의 효율 개선을 위해 우리의 행위가 적절하게 협업하고 간섭하게 만들 수 있다. 실제 수퍼빈은 24년 6월 전국에 1200대 이상의 무인자원회수기 네프론을 운영하며 라벨을 제거한 페트병을 투입하는 사용자에게 매월 약 1.6억 (연간 약 19억원 규모)를 보상금으로 지급하고 있다. 이렇게 분리배출 단계에서 라벨이 제거된 페트병은 플레이크(Flake)라는 재생원료 생산단계에서 90%가 넘는 월등한 수율(투입 재료 대비 생산되는 소재의 비율)과 재생원료 품질을 확보하는데 결정적인 역할을 하고 있다.



결국 인간의 재활용품 선별 역할을 인공지능으로 대체해서 표준범위의 재활용품 확보가 용이해지고, 사람들에게 효율적인 재활용 참여 활동을 유인하고(UX), 참여에 대한 경제적 혜택까지 디지털 기술을 이용하여 안전하고 쉽게 제공할 수 있다.

2-3 순환경제의 이론적 구조 중 “②물류와 보관”

순환경제의 이론적 구조 중 두 번째 단계는 물류와 보관이다. 물류와 보관의 핵심은 첫 번째 단계인 분류와 회수에서 수집된 재활용품이 혼입과 오염을 방지한 상태로 최종 재생원료 생산 공장까지 이동할 수 있도록 하는 연결 단계를 의미한다. 즉, 두 번째 물류와 보관 단계는 잘 선별되어 수집된 재활용품이 다른 재활용품과 혼입되거나 오염되지 않도록 하는 것을 목표로 한다. 단지, 이러한 과정이 현재 선형경제의 폐기물 물류와 비교할 경우 상대적으로 매우 높은 물류 비용이 지불되어야 하는 것을 의미하기도 한다.

그렇다면 이 단계의 핵심은 재활용품의 오염과 혼입을 방지하며, 물류 비용을 최소화해야 하는 것이다. 실제 현재 분리배출된 재활용품은 분리배출된 재활용품 별로 운송되는 경우도 있지만 이는 상당히 예외적인 경우이고, 일반적으로는 수거 후 분리배출 유무와 상관없이 혼입되어서 재활용선별장으로 운반되는 경우가 적지 않다. 이는 재활용품을 선별하는 선별장의 기능이 존재하고, 재활용품 운송에 상당한 비용이 든다는 현실적인 조건 때문이다.

그림5 분리배출 된 순환자원이 물류에서 혼입되는 장면



자료) KBS 뉴스 발췌

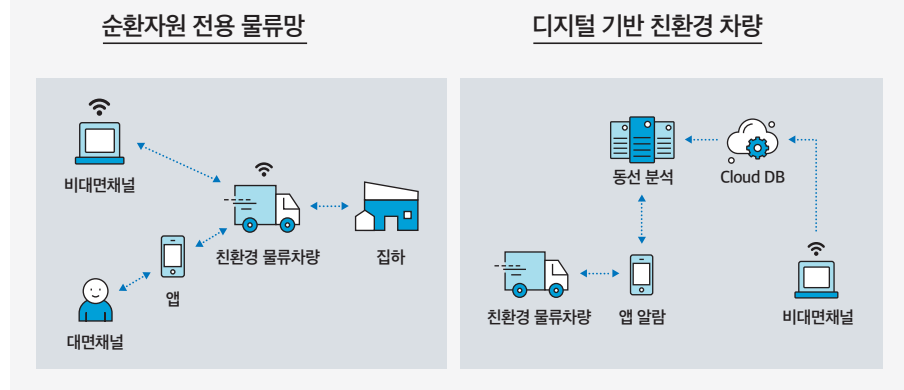
이러한 사업 환경을 기반으로 순환경제 내 재활용품 물류는 물류 비용을 최소화할 수 있는 대안이 필요하며, 혼입과 오염을 방지해서 최종 재생원료의 품질을 확보할 수 있어야 한다.

따라서, 물류 비용 최소화를 위해서는 기본적으로 IoT 기반 물류시스템이 역할을 할 수 있다. 재활용품 수집 차량들의 동선을 최적화할 수 있는 방안이 물류 비용을 줄이는 가장 중요한 요소인데, 이는 순환자원 수집 차량 간 실시간 정보 전달 모듈(Data Relay Module) 개발로 구현이 가능하다. 여기에는 차량 별로 분리배출된 재활용품을 분리해서 운송한다라는 전제와 동시에 고정 배출지와 연결되는 통신망이 구축된다는 것을 전제로 한다. 실제 수퍼빈에서는 무인자원 회수기와 재활용품 수집 차량 간을 IoT로 연결하고, 무인회수기 별 수집된 상황에 따라 매 순간 차량의 동선이 최적화된다. 또한 별도로 재활용품을 수집해서 판매하는 시민들에게도 앱을 통해

소통하고, 동선을 실시간으로 조정해서 방문 후 재활용품을 수집하는 서비스도 제공하고 있다. 이렇게 IoT 기술로 한 대 차량이 복수의 수집 채널(무인자원회수기와 시민들)의 단일 재활용품을 관리하며 수집하는 서비스를 구현하고 있다.

즉, 재활용품 수집 차량들이 기존의 정해진 고정 배출지의 재활용품을 수집하기 위해 투입되어 운영되고 있기 때문에 추가 투자비용 없이 추가적인 재활용품 수집 물류를 최대한 확대할 수 있다는 뜻이다. 이는 중요한 물류 비용의 개선 사항이며, 이러한 인프라 확대를 통해 규모의 경제가 갖춰지면 선형경제 기반의 재활용품 수집에서 혼입을 허용하는 비효율적인 부분을 대체할 수 있는 물류망이 갖춰지게 된다.

그림6 순환경제 내 IoT 기반의 물류차량의 최적 동선 설계 개념도



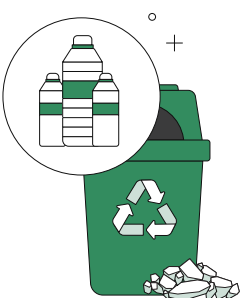
자료) 수퍼빈 제공 자료

이렇게 확보된 재활용품은 순도를 유지하며, 오염되지 않도록 관리되어 재활용 공장이나 전처리 공장으로 이송하게 되며, 이를 기반으로 후방 가치사슬인 가공공정에서 부가가치가 극대화될 수 있다.

2-4 순환경제의 이론적 구조 중 “③가공 소재화”

순환경제의 이론적 구조 중 마지막 세 번째 단계는 가공 소재화 공정이다. 가공 소재화 단계의 핵심은 첫 번째 단계인 분류와 회수에서부터 선별되어 수집된 재활용품이 최종 수요처인(예: 페플라스틱인 경우 석유화학회사 등)에게 납품되기 위한 재생원료로 가공되거나 전처리되는 과정을 의미하며, 사실상 순환경제 고리의 마지막 완성을 의미하기도 한다.

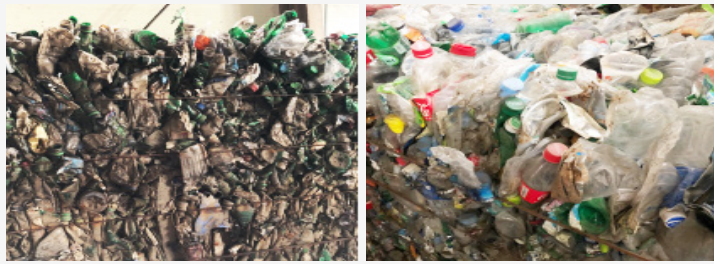
순환경제의 재생원료에 대해서는 산업적 규격과 표준이 제시된다는 것이 선형경제의 재생 원료와 가장 큰 차이이다. 즉, 신재(Virgin)와 섞어서 사용할 수 있는 수준의 재생원료를 요구



하고 있기 때문에 특정 수준까지의 품질 뿐 아니라 품질의 일관성과 추적가능성(Traceability), 안전성 등을 요구한다.

특히, 폐플라스틱의 고부가가치 재활용은 매우 까다로운 규제기관의 규격과 안전규정에 부합 되도록 제도가 설계되고 있기 때문에 현재와 같은 폐기물 재활용 방식으로 생산되는 재생원료는 이러한 조건에 맞추기 어렵다. 하지만 역으로 이러한 규정에 부합될 수 있는 재생원료라면 시장 내 가치가 매우 높아질 수 있는 소재로 인정되고 이에 대한 사업성이 확보될 수 있다. 실제 산업현장에서 이러한 규정에 부합되는 폐플라스틱 가공품을 구하기가 어려워 품질이 확보되는 재생원료의 가격이 오르고 있는 추세이다.

그림7 분리배출 된 순환자원이 물류에서 혼입되는 장면



자료) 수퍼빈 제공 자료

결국 석유화학회사 등과 같이 재생원료를 사용하고자 하는 기업에게 구매 매력을 확보한 재생원료는 1) 품질의 규격이 버진과 유사한 범주 내 있어야 하며, 2) 재생원료 생산의 과정과 원료 수급을 데이터로 추적 또는 증명할 수 있어야 하고, 3) 사용자 피드백을 받아 필요할 경우 재활용품 수집 과정 또는 재생원료 가공공정에 반영할 수 있어야 한다. 결국은 재생원료 역시 신재와 마찬가지로 생산 공정이 가공 공정의 데이터를 구축하고, 이러한 데이터를 기반으로 재생원료 수요기업과 품질 및 생산에 대해 논의할 수 있어야 한다는 의미이다.

그림8 폐플라스틱 가공 제품에 대한 비교



자료) 수퍼빈 제공 자료

3 결론

산업혁명 이후 인류사회가 발전시켜 온 선형경제는 이제 그 여정의 끝에 도달하고 있다. WWF 보고서에 의하면 1만년 전 지구 포유동물 중 인류의 비중은 0.15%였으나 지금 현재는 56% 수준이며 이는 계속 상승 중이라고 한다. 결국 우리 인류는 지구 내 다른 생물들과 공존할 수 있는 방법을 찾아야 하며 그 중 하나가 순환경제라는 새로운 형태의 사회경제구조이다.

다행히도 이러한 변화의 시점에 우리 인류가 가진 인공지능, 디지털 정보체계 등의 순환경제로 전환에 역할을 할 수 있다는 기대는 긍정적이다. 물론 순환경제 구축에 대한 투자와 제도 설계에 대한 즉각적인 결단과 행동이 시급하다.

선형경제 역시 그 역할론이 오랜 시간 인정 받아야 하지만 새로운 문명인 순환경제의 인프라를 구축하여 자원순환에 대한 대전환을 이루는 것은 더 이상 늦어지면 안된다. 우리 다음 세대를 위하여 지금의 대담한 도전과 전환의 비용을 투입해야 한다. 더 늦어지면 전환의 기회 자체가 없을 수 있다. 새로운 문명을 받아들여야 할 순간이다.

참고문헌

- 김경민(2020), 1회용 포장재 재활용 활성화를 위한 보증금제도 도입 방안, 「입법정책보고서」, 제75호, 1-61
- 박희주(2020), EU의 신순환경제실행계획의 주요내용과 시사점, 「소비자정책동향」제105호, 1-17.
- 서울과학기술대학교 산학협력단 (2020), 재활용품 분리배출 체계 전반 개선을 위한 연구용역, 한국환경공단
- 한국환경산업기술원(2022), 「생활폐기물재활용기술개발사업 2022합동워크샵」한국환경산업기술원
- Brenda Platt, Doug Rowe(2002). Reduce, Reuse, Refill! Institute for Local-Reliance
- Hans Breukelman, Harold Krikke, Ansje Lohr(2019). Failing Services on Urban Waste Management in Developing Countries: A Review on Symptoms, Diagnoses, and Interventions, MDPI
- MIT media lab(2021). Beyond Smart Cities: Emerging Design and Techonolgy, MIT
- MIT Sloan School of Management, MIT Computer Science and Artifical Intelligence Laboratory(2020). Artificial Intelligence: Implications for Business Strategy, MIT
- Winpol EU(2019). Upgrading wsste management infrastructure in Malta, Interreg EU