

ICT기반 폐플라스틱 관리 전주기 기술 동향

ICT-based Waste Plastic Management Life Cycle Technology

문영백 (Y.B. Moon, moonyb@etri.re.kr) 환경ICT연구실 책임연구원
정훈 (H. Jeong, hjeong@etri.re.kr) 환경ICT연구실 책임연구원
허태욱 (T.W. Heo, htw398@etri.re.kr) 환경ICT연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

To solve the challenge of waste plastics, this study investigated the related technologies and company trends along the plastic life cycle, and primarily describes ICT technologies to improve efficiency in the process of sorting and sorting waste plastics. Waste plastic discharge caused by the explosive increase in parcel traffic because of COVID-19 is also growing exponentially. Hence, waste treatment is emerging as a social challenge. Most of the domestic waste classification depends on the manual process according to the waste pollution level. The plastic material classification approach using the spectroscopy approach reveals a high error in the contaminated waste plastic classification, but if the Artificial Intelligence-based image classification technology is employed together, the classification precision can be enhanced because of the type of waste plastic product and the contaminated part can be differentiated.

KEYWORDS ICT, 전주기, 폐플라스틱

1. 서론

본고에서는 폐플라스틱 문제 해결을 위해 생산, 유통소비, 수집, 분류, 폐기, 재활용 및 재사용에 대한 플라스틱 전주기에 따른 관련 기술을 살펴보고, 주로 폐플라스틱의 선별 및 분류 과정에 있어 효율을 높이기 위한 ICT 기술에 대해서 설명하고자 한다.

전국 곳곳에 쌓이는 쓰레기산, 점점 심각해지는 쓰레기 처리 문제, 플라스틱 배출량의 증가, 페플라

스틱의 방치로 인한 미세플라스틱 발생 등 폐플라스틱 문제로 인하여 국민 생활이 위협받고 있는 상황이다. COVID-19로 인한 택배 물동량의 폭발적 증가에 따라 폐플라스틱 배출 역시 기하급수적으로 증가하면서 폐기물 처리가 사회문제로 대두되고 있다.

폐플라스틱은 해양을 포함한 지구환경 오염의 주범으로 대두되고 있으며, 지구 온난화 및 지속가능성 문제까지 그 영향력이 확대되고 있다. 해안가 및

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370404>

* 본 논문은 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2022년도 문화체육관광 연구개발사업으로 수행되었음[과제명: 안전한 실내 스포츠 활동을 위한 지능형 실내 환경 및 안전관리 기술 개발, 과제번호: SR202006001].



해양에 버려진 플라스틱으로 인한 미세플라스틱이 증가하고 있다. 수산물 섭취가 많은 식습관의 영향으로 미세플라스틱 섭취로 인한 유해성 위협이 증가하고 있다. 인천 및 낙동강 하류의 미세플라스틱 농도가 세계 2위와 3위 수준으로 수질 오염 또한 심각한 수준에 이르고 있다[1].

생활 환경의 변화, 특히 COVID-19로 인하여 2019년 대비 택배량 19.8%, 배달음식 75.1% 증가로 폐플라스틱 14.6%, 폐비닐 11%씩 급증하였다. 정부는 플라스틱 전주기 발생 저감 및 재활용 대책으로 2025년까지 20% 감축과 재활용 비율 70%로 상향(현재 54%) 정책을 발표하였다. 투명 페트병에 대해서 사용량이 많은 플라스틱 재질에 대한 분리수거통 추가 설치를 통해 2022년까지 4종의 플라스틱 분류를 진행할 계획이다.

국내 폐플라스틱의 처리는 재활용 62%, 소각 32%, 매립 5%로 나타나지만, 물질 재활용이나 에너지 회수(시멘트 소성로, 폐기물 고형연료, 소각 열에너지) 등 세부화된 통계 및 데이터 관리 체계가 미흡한 상태이다. 플라스틱의 생산부터 소비, 재활용에 대한 관리 체계가 정립되어 있지 않아 폐플라스틱 문제에 대한 해결을 위한 분석 및 재활용 기술 적용, 정책수립 등에 어려움이 있다[2].

폐기물 오염도에 의한 국내 폐기물 분류는 대부분을 수작업에 의존하고 있다. 분류된 폐플라스틱은 분류 순도에 따라 큰 가격 차이가 있다. 근적외선을 이용한 플라스틱 분류방법은 특정 종류에 한하여 약 95%의 선별성능을 보이고 있지만, 플라스틱 재활용 공정에서는 다종의 플라스틱에 대한 높은 정확도를 요구한다. 그리고 블랙 플라스틱에 대한 인식문제가 존재한다.

근적외선을 이용한 플라스틱 분류방법과 이미지 기반 분류방법을 융합하여 유색, 무색 플라스틱을 선별할 수 있으며, 오염된 폐기물에서는 선별능력

을 높이고자 한다.

대규모로 발생하는 폐플라스틱의 재활용을 위해서는 신속하고 정확하게 분류해야 하지만, 현재 기술로는 다양한 형태와 색을 가지는 폐플라스틱의 자동 분류작업은 불가능하며, 대부분 수작업이 필요한 상황이다. 또한 열악한 작업환경에서 대량의 폐플라스틱 자동 선별을 위한 초고속/초정밀 픽 앤 플레이스 작업 자동화 기술이 요구된다.

II. 국내외 기술 동향

1. 플라스틱 분류 기술

가장 손쉬운 방법으로 수작업에 의한 분류가 이루어지며 작업 인력의 분별력과 숙련도에 따라 정확도가 달라지며 많은 작업 인력과 시간이 소요되지만, 아직까지도 미국 같은 선진국에서도 사용하는 방법이며 국내에서도 주로 수작업에 의존하고 있다. 플라스틱 재활용을 위한 자동 분리선별을 위해서 비중선별, 정전선별, 레이저 선별, 색상 선별 등 이미 개발된 다양한 선별 기술들이 존재하지만, 한 가지 기술만을 이용해서 완벽하게 선별하기에는 어려움이 존재한다. 가전, 자동차 등의 경우 금속, 세라믹, 플라스틱 등이 함께 배출되어 이를 선별해야 하는 복합 시스템이 요구된다[3].

가. 비중선별

플라스틱은 표 1과 같이 재질에 따라 비중차가 존재한다. 플라스틱 혼합물을 원심력을 이용하여 비중차에 의해 분리하는 방법이다.

나. 정전선별

혼합 플라스틱으로부터 종류별로 선별하기 위해 플라스틱 조각을 마찰대전 장치에 공급하여 종류에 따라 서로 다른 강도로 대전시킨 후 정전분리장

표 1 플라스틱 수지 비중표

물성수지면	일반명칭	비중
UHMW	초고분자 PE	0.94
PE	폴리에틸렌	0.93~0.96
PP	폴리프로피렌	0.9
PVC	염화비닐	1.3~1.6
ABS	아크릴로나이트릴 뷰타다이엔 스타이렌	1.02~1.08
PS	폴리스틸렌	1.02~1.08
MA	아크릴	1.19
6N	6나일론	1.13~1.15
MC	모노카스트나일론	1.14~1.17
PC	폴리카바렛	1.19
PU	폴리우레탄	1.2
Rulon	롤론	2.29
PA	폴리아스탈	1.41
Teflon	테플론	2.1~2.3

치에서 정전기의 강도에 따라 플라스틱을 분리하는 방법이다. 표 2의 예와 같이 마찰대전 특성으로 플러스와 마이너스로 대전되어 분리된다.

다. 색상선별

플라스틱의 분류에 있어 같은 재질별 선별이 이뤄지고 이후로 같은 재질 내에서도 색상별로 분리하여 재활용에 대한 부가가치를 향상시킬 수 있다. 페트와 유리병류는 색에 따라 경제적 가치가 달라지고 재활용 측면에서도 차이가 난다. 색상선별 기술은 가시광선을 이용하여 물체의 표면에서 반사되는 빛의 파장을 이용하여 표면색에 따라 달라지는 파장을 분석하여 선별한다.

라. 근적외선/레이저/초분광 기술

근적외선 분광 및 초분광을 이용하여 플라스틱의 재질에 따른 분류 기술은 1990년대 후반 개발되어 사용되고 있지만, 아직까지도 최종 검수를 위한 수

표 2 플라스틱의 마찰대전 예

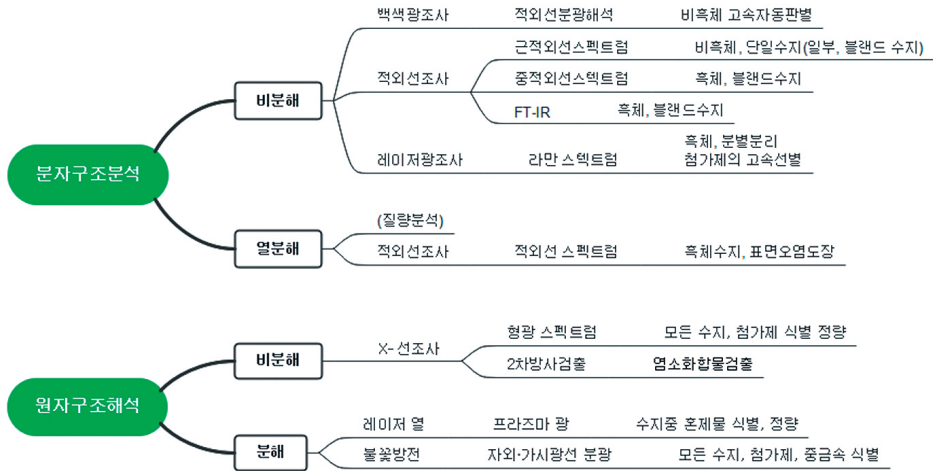
극성	플라스틱
+	PMMA(Polymethylmethacrylate)
	PA(Polyamide)
	ABS(Acrylonitrile-butadiene-styrene Terpolymer)
	PS(Polystyrene)
↓	PP(Polypropylene)
	PE(Polyethylene)
-	PET(Polyethylene Terephthalate)
	PVC(Polyvinyl chloride)
	PTEE(Polytetrafluoroethylene)

출처 Reproduced with permission from [4].

작업이 병행되고 있다. 분광 기술을 이용한 플라스틱 분류 기술은 어두운 색상과 검은 색상의 플라스틱에 대한 구분이 어려운 한계점을 가지고 있다. 블랙 플라스틱은 최근 레이저 분광법을 이용하는 방법이 적용되고 있다. 그림 1을 보면 비분해방식 중 중적외선스펙트럼, FT-IR(Fourier transform Infrared), 라만스펙트럼을 통한 흑체 분석이 가능한 것을 알 수 있다. 분광 기술은 깨끗하게 유입되는 폐플라스틱에 대해서는 높은 분류 정확도를 가지지만, 내부에 남아 있는 음식물과 외부의 습기 등으로 오염되면 분류 정확도가 낮아진다.

마. Artificial Intelligence 이미지 인식 기술

이미지넷(ImageNet) 데이터셋은 MNIST(Modified National Institute of Standards and Technology database), CIFAR(Canadian Institute For Advanced Research) 데이터셋과 더불어 굉장히 유명한 데이터셋이다. MNIST나 CIFAR는 주로 아이디어에 대한 검증 목적으로 사용되고 있고, 이미지넷은 대표적인 대규모 데이터셋이다. 전체 데이터셋에 포함된 이미지만 해도 1,000만 개가 넘는다. 이 데이터셋은 1,000



출처 Reprinted with permission from [5].

그림 1 분자구조분석에 따른 플라스틱 판별기술

개의 클래스로 구성되며, 총 100만 개가 넘는 데이터셋을 포함한다. 약 120만 개는 학습(Training)에 쓰고, 5만 개는 검증(Validation)에 쓴다.

폐플라스틱 분류에 있어 AI 이미지 분류 기술을 적용하기 위해 다양하고 충분한 데이터셋의 구축이 필수적이다. 이미지넷과 같이 다양한 재질, 형태, 오염도 등이 반영된 방대한 폐플라스틱 이미지 데이터셋을 구축하고 이를 이용한 폐플라스틱 분류 엔진을 개발하면 충분한 성능을 기대할 수 있다.

2. 폐플라스틱 피킹 로봇 시스템 기술

폐플라스틱 선별 작업 동작은 폐플라스틱을 집어 올린 뒤 이송하여 떨어뜨리는 단순한 직선 운동이고 빠른 작업 속도가 요구되므로 이를 만족하는 로봇 시스템이 필요하다. X-Y-Z 축 직교 로봇(핀란드 젠로보틱스 등) 또는 3~4축 델타 로봇(미국 AMP 로봇틱스 등)이 주로 사용되고 있다. 미국 Bulk Handling Systems(BHS)가 Max-AI AQC-C라는 제품에 양팔

협동 로봇을 활용한 사례가 있으나 비교적 속도가 느린 단점이 존재한다.

폐플라스틱은 다양하고 불규칙한 표면이지만 가공성이 아니고 가벼우므로, 대부분 사례에서 로봇 말단부에 진공 그리퍼를 사용하는 것을 찾아볼 수 있다. 진공 그리퍼 수직 방향 스프링-댐퍼 메커니즘을 사용하여 폐플라스틱에 수직으로 접근할 때 충격을 흡수할 뿐만 아니라 충분한 힘으로 눌러서 진공을 형성하도록 한다. 젠로보틱스사에서는 대형 및 고중량의 경우 공압 또는 유압으로 구동되는 집게형 그리퍼를 사용하여 건설폐기물에 적용하였다.

3. 플라스틱 관리 기술

표준기반의 플라스틱 관리 체계가 정립되지 않아서 플라스틱 전주기 데이터 관리 체계 및 방법이 부재한 상황이다. 플라스틱 소재품의 생산, 유통, 소비 단계에서의 플라스틱 소재의 효과적 분류 및 재활용에 필요한 상세 정보 획득, 이력, 모니터링 수단

도 부재한 상황으로 이에 따른 플라스틱 자원재활용을 위한 정책수립 등에 어려움이 따르고 있다.

일본 미쓰비시 사는 자기순환 재활용 시스템을 구축하여 회수한 가전제품으로부터 폐플라스틱을 다시 가전제품에 사용하는 자기순환 리사이클을 실시하고 있다.

4. 국내외 업체 현황

가. 슈퍼빈

국내 기업으로 재활용이 가능한 페트와 병만 골라내어 이를 재활용 업체에 판매하고, 재원은 사용자에게 보상하는 인공지능 순환자원 회수로봇 ‘네프론’을 상용화하여 전국에 317대(2021년 8월 기준)를 설치 운영하고 있다. 약 4,000만 장의 폐기물 이미지를 학습한 인공지능을 이용하여, 페트병과 캔을 활용한 카메라를 통해 4~5초 이내에 95%에 달하는 정확도로 자원을 판독·선별한다.

나. 이오니아이엔티(Ionia E&T)

생활폐기물 자동 선별 시스템 설비를 생산하고 있으며, 자동으로 철캔 및 고철류의 선별, 혼합플라스틱을 플라스틱 재질별로 분류하는 건식 선별, 알루미늄캔류의 선별을 지원한다. 플라스틱의 선별을 위해서 근적외선 분광법(Near-Infrared Ray)을 이용하여 95% 이상의 플라스틱 종류별 선별을 지원한다. 선별된 페트병을 색상선별 기술을 활용하여 색상별로 구분하여 고부가가치 물질 재활용 원료로 사용 가능하게 지원한다.

다. 우림아이씨티

분광 기술과 인공지능 기술을 접목한 영상 분석 솔루션을 활용한 플라스틱 분류 기술을 보유하고 있다. 다분광 센서, RGB 카메라, 마그네틱 센서, 인

덕티브 센서 등을 사용하여 플라스틱의 종류별 분류 외에도 알루미늄 및 철 선별을 지원한다. 플라스틱 분류 기술 외에도 NB-IoT망을 이용한 자원 회수 기기의 실시간 상태 확인 및 상태 관리를 지원하며, 사용자 앱을 통한 인증 및 지급 포인트 관리 등 다양한 사용자 지원 서비스를 제공하고 있다.

라. 앤에이치씨

2차전지 표면 상태 검사를 하는 업체로써 보유하고 있는 고속 영상 분석 기술을 활용하여 플라스틱 분류 기술 개발을 진행하고 있다.

마. (주)에이트테크

국내에서 AI 기반 폐기물 분류 로봇을 개발한 첫 사례를 가지고 있다. 2020년 설립된 스타트업 기업으로, 2021년 5월 AETECH20 및 2021년 9월 월드 스마트시티 엑스포에 참가하여 관련 기술을 홍보하였다.

바. TOMRA(노르웨이)

전 세계 100개 이상의 국가에서 1만 개에 가까운 TOMRA 시스템을 판매하여 60% 이상의 글로벌 시장 점유율을 확보하고 있다. 1972년에 설립된 TOMRA는 전 세계 재활용 및 폐기물 관리 산업에 사용되는 센서기반 분류 시스템의 설계 및 제조하고 있다. 1996년 음료 용기를 분류 및 회수하도록 세계 최초로 근적외선(NIR: Near Infrared Radiation) 센서를 활용한 시스템을 개발하였다.

사. PELLENC ST(프랑스)

전 세계 40개국에 1,800여 대의 장비를 설치 운영하는 폐자원 선별기를 생산하는 기업이다. 광학기술(NIR/VIS(Visual Identification System) 센서)과 유도자장원리를 이용하여 플라스틱, 금속, 종이, 섬유, 목

재와 같이 다양한 물질의 재질과 색상의 선별이 가능하다.

아. STEINERT(독일)

그동안 플라스틱 분류가 이루어지지 못했던 블랙 플라스틱에 대한 광학 분류 시스템을 개발하였다. Unisort Black 제품은 기존의 NIR 분광기에서 분리하지 못했던 어둡거나 검은 물체를 감지하여 분류한다.

자. TrinamiX(독일)

독일 화학 기업 바스프의 자회사인 트라이나믹스(TrinamiX)는 자사가 보유한 근적외선 분광 기술을 이용하여 플라스틱 분류를 위한 모바일 솔루션을 개발하였다.

차. ZenRobotics(핀란드)

건설폐기물과 같은 고중량 폐기물 분류 로봇 ‘헤비 피커(Heavy Picker)’와 저중량 폐기물 분류 로봇 ‘패스트 피커(Fast Picker)’를 개발하였다.

카. Bulk Handling Systems(BHS)(미국)

2019년 Max-AI VIS(Visual Identification System 용)와 하나 이상의 협업 로봇(CoBot)으로 구성된 솔루션인 Max-AI AQC-C를 출시하였다. 2017년 미국 폐기물 처리 시설인 Penn Waste사에서 BHS의 Max-AI 제품 도입으로 MRF(Material Recovery Facility) 용량 30% 증대, 인건비 절감, 분류 품질 향상의 성과를 획득하였다.

타. AMP 로보틱스(미국)

2017년 재활용 분류 로봇 ‘AMP코텍스’를 개발하였다. 미국 내 기업과 지자체들을 대상으로 분류 로봇 임대 비즈니스 진행 중에 있다.

파. Machinex(캐나다)

폐기물 재활용 전문기업으로 2019년 SamurAI라는 분류 로봇을 출시하였다. Machinex사의 비전시스템은 적외선 초분광 기술, 시각 인식 및 금속 탐지 등의 기술을 기반으로 실시간으로 재료 유형, 구성 및 오염에 따른 재료 흐름의 분석을 제공하고 있다.

하. 중국

플라스틱 재활용을 위한 분류 기술에 있어서 많은 기업이 존재하고 있다. anysort, angelon, JONO, woloptoelectronic, Wuxi bird machinery technology, SG Color sorter 등 많은 플라스틱 분류 회사가 있다.

V. AI 기반의 분광 선별 기술

폐플라스틱 분류에 요구되는 NIR/MIR(Mid Infrared Radiation) 센서에 대한 국산화가 이루어지지 못한 실정이다. 폐플라스틱 분류를 위해 사용되는 근적외선 센서는 고가의 가격으로 인해 근적외선 센서를 활용한 폐플라스틱 분류기의 보급에 제약이 많다. 근적외선 센서로는 최근 가전제품에서 많이 사용되는 블랙 플라스틱에 대한 분류가 어려워 블랙 플라스틱 분류를 위한 MIR 대역의 센서 개발이 요구된다.

멀티스펙트럼(가시광 영역, 근적외선 영역)의 패턴 데이터 분석을 통해서 99% 이상 정확도의 분류 알고리즘을 제공해야 한다.

기존의 분광법에 AI 기반의 비전 융합 기법을 적용하여 플라스틱 분류 정확도의 향상을 기대할 수 있다.

분광법을 이용한 플라스틱 재질 분류방법은 오염된 폐플라스틱의 분류에서 높은 오류를 나타내지만, AI 기반의 이미지 분류 기술을 같이 활용하면 폐플라스틱 제품의 종류와 오염된 부위를 구분할 수 있

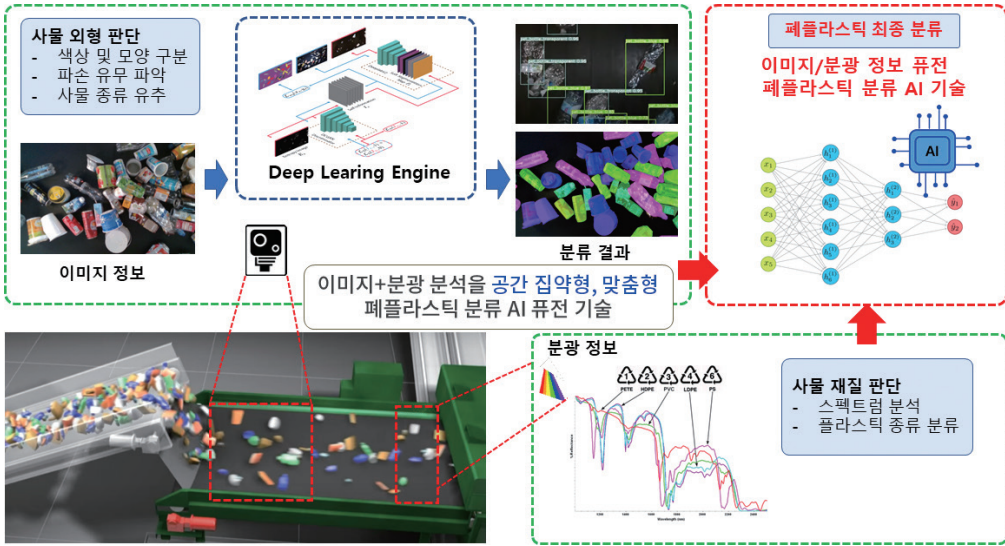


그림 2 이미지/분광 정보 퓨전 폐플라스틱 분류 AI 기술

으므로 분류 정확도를 향상시킬 수 있다. 그림 2에
서와 같이 폐플라스틱 이미지 정보에 대한 AI 분석
을 통해 색상, 모양, 파손, 오염 등에 대한 분류 결과
를 수행하고, 분광 분석 기술을 통한 스펙트럼 분석,
플라스틱 종류 분류를 수행한다. 이미지 AI 분석과
분광 분석을 퓨전하여 각각의 분석방법을 보완하여
폐플라스틱 최종 분류에 대한 성능을 높이게 된다.

1. 이미지 분류 AI 기술

플라스틱 제품에 대한 다양한 사진 정보를 구축한
다. 플라스틱 재활용 선별장에서의 변형되고 오염된
제품의 다양한 사진 정보를 수집한다. 이를 이미지
기반 학습을 통해 플라스틱 분류 AI 기술을 개발한다.

2. 근적외선/레이저/초분광 분석 기술

근적외선/레이저/초분광 분석 기술을 통한 플라
스틱별 스펙트럼 프로파일을 구축한다. 폐플라스틱

의 변형에 따른 스펙트럼 프로파일을 구축한다.

3. AI 기반 이미지 분석과 분광법 융합을 통한 폐플라스틱 분류 엔진

이미지 분석을 통한 분류와 분광법을 통한 분류
의 성능 비교 및 특성을 분석한다. 2가지 분류 기법
을 융합한 재활용 플라스틱 분류 엔진을 개발한다.

V. 결론

본고에서 플라스틱 문제 해결을 위한 폐플라스틱
전주기 기술 동향에 대해서 알아보았다. ICT 기술
이 적용되고 효율을 향상시킬 수 있는 부분으로 수
집, 분류, 전주기 관리 등이 고려될 수 있다. ICT 기
술을 적용하여 자동화되고 신속히 폐플라스틱을 자
원으로 재사용 또는 재활용이 가능하게 된다. 아직
은 대부분 수작업으로 진행되고 전주기 단계별로도
표준화된 관리체계가 정립되지 않은 상태라 기술의

요구 및 적용이 시급한 상황이다. 이러한 요구에 맞춰 국내외 다양한 업체에서 관련 제품과 서비스를 제공하고 있다.

폐플라스틱의 분류작업에 있어 분광법의 블랙 플라스틱 문제를 해결하기 위한 MIR 센서의 국산화가 시급한 상황이다. 다양한 분야에서 많이 시도되고 제공되는 AI 이미지 인식 기술을 적용하여 AI 기반 이미지 분석과 분광법 융합을 통한 폐플라스틱 분류 엔진을 개발하여 분류 성능을 향상시키고 자원으로써의 재활용률을 높여 경제적 이득과 가치를 증대하고 환경오염을 낮추는 역할을 수행할 것으로 기대된다.

약어 정리

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AI	Artificial Intelligence
CIFAR	Canadian Institute For Advanced Research
FT-IR	Fourier Transform Infrared
ICT	Information & Communications Technology

NIR	Near Infrared Radiation
MIR	Mid Infrared Radiation
MIST	Modified National Institute of Standards and Technology database
PA	Polyamide
PE	Polyethylene
PET	Polyethylene Terephthalate
PMMA	Polymethylmethacrylate
PP	Polypropylene
PS	Polystyrene
PVC	Polyvinyl chloride

참고문헌

- [1] 한국기계연구원, “플라스틱 폐기물로 인한 생태환경 위해요인 개선,” 사전기획연구 보고서, 2019.
- [2] 이정임, 정혜윤, “폐플라스틱 관리정책의 한계와 시사점,” 자원리사이클링, 2020.
- [3] 조영주, 조봉규, “폐플라스틱 리사이클링의 현주소 및 향후 방향,” 이슈&진단, 2019.
- [4] 최형석, 고재승, 서강일, “폐플라스틱의 분리·선별 기술,” 고분자과학과 기술, 2002. 6.
- [5] 최형기 외, “근적외선 분광법을 이용한 폐플라스틱 분리선별 기술개발,” 공업화학 전망, 2007.