

LIBS를 이용한 흑색 플라스틱의 자동선별 시스템 개발

박은규* · 정밤빛* · §최우진* · 오성권**

*수원대학교 IT-환경융합연구센터, **수원대학교 전기공학과

Development of Automatic Sorting System for Black Plastics Using Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

Eun Kyu Park*, Bam Bit Jung*, §Woo Zin Choi* and Sung Kwun Oh**

*Center for IT and Environmental Research, The University of Suwon, 17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwasung-si, Gyeonggi 18323, Korea

**Department of Electrical Engineering, The University of Suwon, 17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwasung-si, Gyeonggi 18323, Korea

요 약

소형가전 제품은 종류가 다양할 뿐만 아니라 구성부품의 재질도 복잡하여 폐기시 재활용이 매우 어려운 실정이다. 특히, 폐소형 가전의 경우 흑색 플라스틱의 함유량이 높을 뿐만 아니라 재질이 다양하여 재활용 공정에서 발생하는 플라스틱의 재질을 인식하여 효율적으로 선별 회수하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 기존 선별기술이 가지고 있는 흑색 플라스틱의 재질별 선별에 대한 기술적 한계 및 단점을 보완하기 위하여 레이저유도붕괴분광법(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)을 기반으로 하는 흑색 플라스틱의 재질별 자동선별 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 정량 공급장치, 위치 자동인식 장치, 레이저유도기반분광분석(LIBS) 장치, 선별분리장치 및 Control unit 등으로 구성되어 있다. 레이저유도붕괴분광법(LIBS)을 이용하여 흑색 플라스틱의 재질별 특성 스펙트럼 데이터를 획득하고, 인공지능형 알고리즘을 적용한 분류기를 설계하여 적용함으로써 흑색 플라스틱의 재질을 효율적으로 인식하고 분류할 수 있다. 본 연구에서 개발한 방사형기저함수신경회로망(RBFNNs) 분류기의 분류율은 약 97% 이상으로 나타났으며, 자동선별 시스템의 흑색 플라스틱의 재질별 인식률은 약 94.0% 이상, 선별효율은 80.0% 이상으로 조사되었다. 본 연구에서는 실험실 규모의 자동선별장치를 개발하였으며, 본 장치에 대한 실험결과를 바탕으로 흑색 플라스틱 재질인식 및 선별효율 등을 분석함으로써 향후 폐소형가전의 재활용 현장에 적용할 예정이다.

주제어 : 폐소형가전, 흑색 플라스틱, LIBS, 재질인식, 자동선별, 재활용

Abstract

Used small household appliances have a wide variety of product types and component materials, and contain high percentage of black plastics. However, they are not being recycled efficiently as conventional sensors such as near-infrared ray (NIR), etc. are not able to detect black plastic by types. In the present study, an automatic sorting system was developed based on laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) to promote the recycling of waste plastics. The system we developed mainly consists of sample feeder, automatic position recognition system, LIBS device, separator and control unit. By applying laser pulse on the target sample, characteristic spectral data can be obtained and analyzed by using CCD detectors. The obtained data was then

· Received : November 7, 2017 · Revised : November 20, 2017 · Accepted : November 24, 2017

§ Corresponding Author : Woo Zin Choi (E-mail : wzchoi@suwon.ac.kr)

Center for IT and Environmental Research, The University of Suwon, 17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwasung-si, Gyeonggi-do, 18323, 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.

treated by using a classifier, which was developed based on artificial intelligent algorithm. The separation tests on waste plastics also were carried out by using a lab-scale automatic sorting system and the test results will be discussed. The classification rate of the radial basis neural network (RBFNNs) classifier developed in this study was about > 97%. The recognition rate of the black plastic by types with the automatic sorting system was more than 94.0% and the sorting efficiency was more than 80.0%. Automatic sorting system based on LIBS technology is in its infant stage and it has a high potential for utilization in and outside Korea due to its excellent economic efficiency.

Key words : Used small household appliances, LIBS, Black plastic, Identification, Automatic sorting, Recycling

1. 서 론

생활수준의 향상으로 인하여 전자제품의 사용량은 매년 급속하게 증가하고 있으며 특히, 중소형가전 보급량의 경우 대형가전에 비해 매년 약 두 배 이상 증가하고 있다. 플라스틱은 가볍고 또한 다양한 형태로 가공이 가능하여 전자산업을 비롯하여 다양한 산업에 폭 넓게 사용되고 있다. 플라스틱 제품은 우리의 삶을 편리하고 풍요롭게 만들어 주었지만, 사용 후 폐기 단계에서 다양한 환경오염 문제를 일으키고 있다. 따라서, 지난 반세기 동안 사용 후 폐기되는 플라스틱의 효율적인 선별, 회수 및 안정적인 처리를 위해 많은 연구가 진행되었다¹⁾.

전 세계 가전제품의 생산량은 매년 빠르게 증가하고 있으며 그로 인하여 많은 양의 폐기물이 발생되고 있을 뿐만 아니라 최근에는 안정적인 처리 및 재활용에 대한 관심이 크게 높아지고 있다²⁾. 전 세계적으로 연간 약 5천만톤의 폐가전제품(WEEE 또는 e-waste)이 발생되고 있으나 발생량의 약 15%만이 재활용 되고 있는 실정이다²⁾. 앞서 언급하였듯이 가전제품의 경우 다양한 플라스틱 재질을 활용한 다양한 종류의 제품이 생산되고 있으며, 사용 후 발생하는 폐가전제품(e-waste)에는 철금속류, 알루미늄, 스테인레스 스틸(Stainless steel, STS) 및 구리 등 비철금속류 및 인쇄회로기판(Printed Circuit Boards, PCBs) 등의 유용금속 뿐만 아니라 다량의 플라스틱류가 포함되어 있다³⁾. 폐가전제품의 재활용은 적정처리를 통하여 폐기물의 양을 줄이는 것뿐만 아니라 재활용이 가능한 유용 자원의 회수와 더불어 유해 성분 및 화합물의 안정적인 제거가 매우 중요하다⁴⁾.

전기밥솥, 전기 히터, 진공청소기 등과 같은 소형가전 제품은 다양한 종류의 원료를 사용하여 제조함으로써 발생하는 폐기물의 종류도 매우 다양하고 복잡하다^{1,2)}. 특히, 폐소형가전의 경우 대형가전에 비해 플라스틱의 함유량이 매우 높을 뿐만 아니라 다양한 재질의 플라스

틱을 사용하고 있다^{2,3)}. 또한, 흑색 플라스틱의 함유량이 높으며, 플라스틱의 강도 발현, 화재예방, 제품의 기능성 향상은 물론 제품을 보호하기 위한 코팅제 및 대전방지제 등 각종 첨가제를 다양하게 사용하고 있다^{3,4)}.

소형가전제품의 경우 제조사, 제품의 종류 및 형식, 제조 년월일에 따라 구성하고 있는 재질의 종류가 다양할 뿐만 아니라 플라스틱의 경우 색상, 형태 및 재질 등이 다양하여, 재활용 현장에서 특정 선별기술의 적용이 어려운 실정이다^{3,4)}. 폐소형가전을 재활용하는 업체의 경우 인력에 의하여 철금속류, 구리 등 비철금속류의 유용자원만을 선택적으로 선별/회수하여 재활용하고 있으며, 경제성이 낮은 플라스틱의 경우 재질선별을 하지 않고 혼합물의 형태로 저급 재활용 되고 있는 실정이다^{1,3)}. 민간재활용업체의 경우 폐소형가전을 해체/파쇄 및 선별기술의 부족 등으로 인하여 인력에 의한 작업 의존도가 매우 높을 뿐만 아니라 작업현장이 매우 열악한 실정이다³⁾. 따라서, 다량의 유용자원을 포함하고 있는 폐소형가전을 효율적으로 재활용하기 위해서는 다양한 구성 물질을 선별/회수 할 수 있는 기술 개발이 시급한 실정이다. 또한, 폐소형가전으로부터 발생하는 흑색 플라스틱의 재질을 자동으로 인식하여 선별할 수 있는 기술을 개발하고, 상용화하여 폐소형가전의 재활용을 촉진 시킬 수 있는 기반 구축이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 시료의 위치 자동인식 장치, 실시간으로 흑색 플라스틱의 재질을 인식하는 레이저유도기반분광분석(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) 장치, 재질별 선별/회수를 위한 선별분리장치 및 선별 시스템 각각의 장치를 제어하기 위한 Control unit 등으로 구성된 흑색 플라스틱 재질별 자동선별 시스템을 개발하였다. 또한, 폐소형가전으로부터 발생하는 흑색 플라스틱의 재질별 특성을 분석하였으며, 획득한 흑색 플라스틱의 재질별 특성 데이터를 주성분 분석법과 인공지능형 알고리즘 기반의 분류기를 설계하여 재질인식 효율을 크게 개선하였다. 향후 본 연구에서 개발한 흑

색 플라스틱 자동선별 시스템에 대한 성능 개선 및 보완 등을 통하여 재활용 현장에 적용하고자 한다.

2. 폐소형가전 특성 및 현황

Table 1에는 국내 폐가전 재활용 의무대상품목을 요약하여 제시하였다. 국내의 경우 2003년부터 대형가전과 통신사무기기 제품 등 10개 품목을 포함한 생산자 책임재활용제도(Extended Product Responsibility, EPR)

가 시행되었다. 특히, EPR제도는 지난 10여년간 폐가전 제품의 재활용율 향상에 크게 기여하였으며, 2014년부터 중·소형가전제품 17개 품목을 재활용 대상에 추가하여 모두 27개 품목으로 확대 되었다. 정부의 EPR 제도의 확대 시행, 무상방문수거서비스(Door to Door, DTD) 실시, 재활용 목표 관리제 및 환경성 보장제(EcoAS) 등의 실시로 폐소형가전의 재활용량은 크게 증가하였다^{3,5)}.

Fig. 1에는 폐소형가전의 발생 및 처리현황을 제시하

Table 1. EPR target items for WEEE recycling in Korea

Classification		Application time ('03~'13)	Extended Items ('14.1.1~)
Target product	Large household appliances	TV, Refrigerator, Washer, Air conditioner, Automatic dispenser	-
	Communication & office equipment	Computer, Facsimile, Printer, Audio, Copier, Cell phone	-
	Medium household appliances	-	Water purifier, Food disposal, Dish dryer, Electric oven, Microwave oven
	Small household appliances	-	Air Cleaner, Electric bidet, Blender, Electric rice cooker, Electric iron, Electric heater, Water softener, Vacuum cleaner, Vending machine, Electric fan, Humidifier, Video player
Subtotal		10items	17items
Total		27items	

※ Source : Ministry of Environment, <http://www.me.go.kr>.

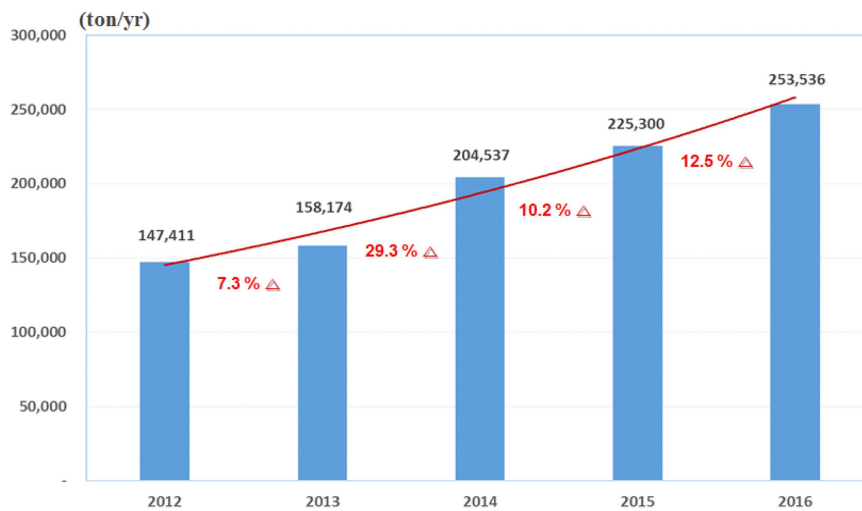


Fig. 1. Amount of the generation and treatment of the used small household appliances.

Table 2. The composition of used small household appliances after dismantling process

(unit : wt.%)

Equipment category	Ferrous metals	Non-ferrous metals	PCBs	Others	Plastics			Total
					Color	Black	Subtotal	
Air cleaner	5.58	-	1.87	24.25	1.47	66.83	68.30	100
Electric heater	36.72	6.73	0.04	15.11	9.80	31.60	41.40	100
Audio (CD player)	19.14	0.89	8.12	24.52	0.05	47.28	47.33	100
Electric rice cooker	12.88	26.16	7.82	6.03	34.33	12.78	47.11	100
Humidifier	5.27	1.24	6.59	31.66	54.87	0.37	55.24	100
Electric iron	51.28	4.73	-	13.41	20.40	10.18	30.58	100
Electric fan	23.20	-	0.51	35.72	39.96	0.61	40.57	100
Vacuum cleaner	2.57	-	0.79	44.56	50.37	1.71	52.08	100
Electric bidet	3.36	4.88	7.94	10.11	73.71	-	73.71	100

였다. EPR 제도의 확대 시행으로 2014년의 경우 전년 대비 약 29.3%가 증가한 약 204,537톤, 2016년에는 253,536톤의 폐소형가전이 재활용되었으며, 향후 재활용량은 지속적으로 증가할 것으로 예측된다.

Table 2에는 폐소형가전제품 중 9개 품목을 선정하여 해체한 후 구성물질의 물리적 성상을 분석한 결과를 요약하여 제시하였다. 분석에 사용한 폐소형가전은 경기도 H시에 위치한 민간수집업체를 통하여 확보하였으며, 수작업으로 해체한 후 각 구성 물질별로 분류하였다. 폐소형가전은 제품의 종류 및 품목에 따라 구성 물질과 플라스틱의 재질이 매우 다양하였으며, 철금속류, 비철금속류, 플라스틱류, PCBs 및 기타 부품류 등으로 분류하였다. 폐소형가전제품을 구성하고 있는 내부 물질 중 비율이 가장 높은 품목은 철금속류의 경우 전기다리미가 약 51.28%, 비철금속류의 경우 전기밥솥은 약 26.16% 그리고 PCBs는 오디오/CD플레이어가 약 8.18% 등으로 분석되었다. 또한 기타 부품류 즉, 유리, 콘덴서 등의 경우 믹서기가 약 63.88%로 가장 높게 나타났으며, 플라스틱류의 경우 진공청소기가 약 44.56%로 분석되었다. 폐소형가전제품에 포함된 플라스틱류는 유색과 흑색으로 구분하였으며, 플라스틱의 함량은 비데가 약 73.71%, 공기청정기 약 68.30%, 진공청소기 약 52.08% 등으로 매우 높게 조사되었다. 그러나, 흑색 플라스틱의 경우 공기청정기 약 66.83%, 오디오/CD플레이어 약 47.28%, 전기히터 약 31.60% 등으로 분석되었다.

폐소형가전제품으로부터 발생하는 플라스틱을 재활용

하는 업체 대부분의 경우 수선별에 의존하고 있는 실정이며, 재질이 다양하고 흑색 플라스틱의 경우 재질 판별이 어려워서 혼합물의 형태로 저급 재활용되고 있다^{3,4)}. 일반적으로 기존의 플라스틱 재질 선별의 경우 비중선별, 마찰하전형정전선별, 근적외선분광법(Near-infrared spectroscopy, NIR) 등이 가장 많이 사용되고 있다⁶⁾.

비중선별 기술의 경우 ABS와 PS의 비중 값이 유사하여, 본 기술을 플라스틱 재질 분리에 적용하는 것은 쉽지 않을 뿐만 아니라, 선별 후 시료의 세척, 건조 및 폐수처리 등의 문제로 현장적용에 어려움이 있다⁷⁾. 마찰하전형정전선별 기술은 건식공정으로 플라스틱 재질 선별에 유용하게 사용하고 있으나 대전방지제 등의 첨가제가 들어있는 재질이나 여러 종류의 재질이 혼합되어 있을 경우 상호간 하전효과의 감소 및 온도와 습도 조절 등 운전 조건이 까다로워 대규모 처리를 위한 현장적용에 문제점으로 지적될 수 있다^{8,9)}. 근적외선분광법(NIR)은 플라스틱의 재질을 자동 선별하는데 가장 폭넓게 적용되고 있으나, 흑색 플라스틱의 경우 근적외선 파장의 빛을 반사하지 못하고 흡수하므로써 재질 인식이 불가능하여 흑색 플라스틱의 재질별 선별에 활용하지 못하고 있는 실정이다⁷⁾. IR/Raman 분광법의 경우 IR/Raman 분광 스펙트럼 특징점(wavenumber)을 이용하여 흑색 플라스틱의 재질별 인식 및 선별이 가능하다. 그러나, IR/Raman 분광기가 가지고 있는 짧은 초점거리와 재질 인식속도가 느리다는 단점 등으로 인하여 재활용 현장에 적용하기에는 한계가 있다¹⁰⁾.

3. 실험방법

3.1. 레이저유도붕괴분광법(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)

레이저유도붕괴분광법(LIBS)은 조성을 알고자하는 시료의 표면에 나노초의 펄스레이저를 조사하면 일반적으로 플라즈마 신호가 발생한다. 발생된 분광신호를 분석하여 시료 내에 포함된 물질의 종류를 정량/정성적으로 분석할 수 있는 원자 분광법의 하나이다¹¹⁾.

다음 Fig. 2에는 레이저유도붕괴분광법의 측정원리를 제시하였으며, 플라스틱 재질에 따라 플라즈마 분광신호는 차이가 나며, 분광장치(Detector)를 이용하여 플라즈마의 분광신호를 수집/분석하여 재질을 구성하고 있는 원자의 조성을 확인함으로써 흑색 플라스틱의 재질

인식 및 선별에 활용이 가능하다. 레이저유도기반분광 기술은 비접촉방식으로 특별히 시료의 전처리 과정이 필요 없으며, 수십 msec 이내의 매우 짧은 시간 내에 소재를 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 빠른 속도로 선별이 가능할 뿐만 아니라 선별 정확도가 매우 우수하여 근적외선분광법(NIR)의 단점을 보완할 수 있는 기술로 인정받고 있다.

3.2. 흑색 플라스틱 재질별 자동선별 시스템

앞서 언급한 바와 같이 플라스틱의 재질선별에 널리 이용되고 있는 비중선별, 정전선별, 근적외선분광법 및 IR/Raman 분광법 등의 선별기술은 기술적 한계를 가지고 있으며 특히, 흑색 플라스틱의 재질선별에 적용할 경우 높은 선별효율을 기대하기 어려운 단점이 있다. 본

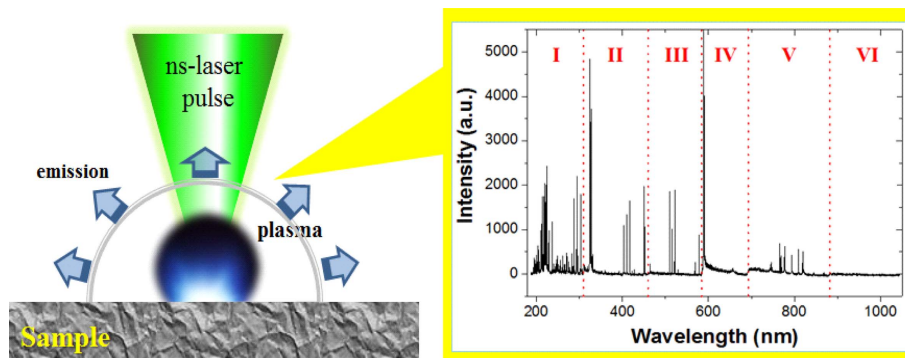


Fig. 2. Principle of LIBS measurement.

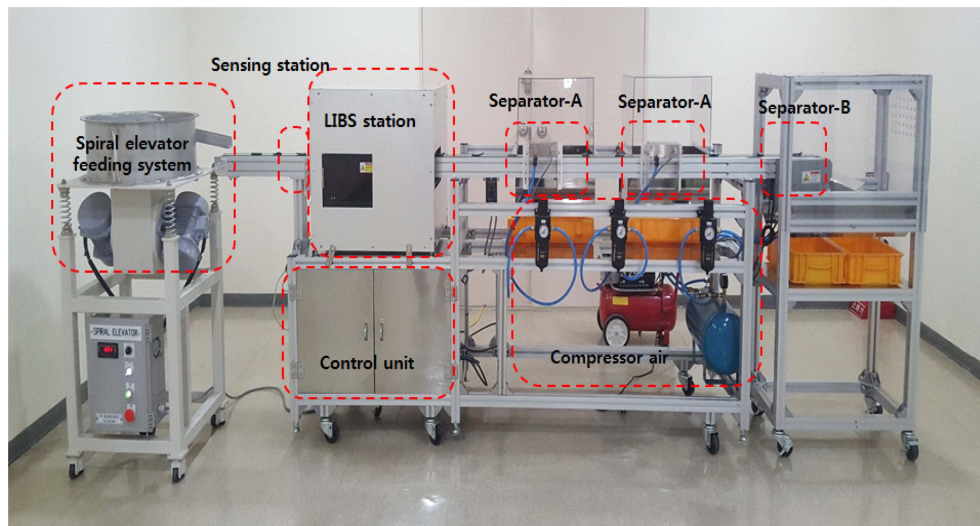


Fig. 3. Lab-scale automatic sorting system based on LIBS.

Table 3. Specification of lab-scale automatic sorting system

Item	Contents	
Capacity	30~50 kg/hr	
Dimension (mm)	1,200(W) × 1,400(H) × 4,500(L)	
Configuration device	Spiral elevator feeding system	<ul style="list-style-type: none"> • 600(W) × 1,300(H) × 600(L) • 220V, 4P, 0.2Kw
	Sensing station	<ul style="list-style-type: none"> • Optical photo fiber sensor • Response speed : 50 μs
	Separator	<ul style="list-style-type: none"> • Solenoid valve : 0.15~0.7 MPa • Response speed : < 12 ms
	Control unit	Power control, Check system, Signal processor, Eject control, etc.
	Conveyer belt, Shute, etc.	

연구에서는 레이저유도붕괴분광법(LIBS)을 이용하여 흑색 플라스틱의 재질별 자동 인식 및 선별이 가능한 자동선별 시스템을 개발하였다.

Fig. 3에는 본 연구에서 개발한 Lab-scale 규모의 흑색 플라스틱 재질별 자동선별 시스템의 실제 모습을 제시하였으며, Table 3에는 시스템을 구성하고 있는 각 장치들의 사양을 나타내었다. 본 자동선별 시스템은 흑색 플라스틱 시료를 일정한 간격으로 자동 공급해 주는 정량공급 장치, 컨베이어 벨트에 투입된 흑색 플라스틱 시료의 위치 정보 등을 자동으로 인식하는 위치 자동인식 장치, 실시간으로 흑색 플라스틱의 재질별 특성 데이터를 분석 및 판별하는 레이저유도기반분광분석(LIBS) 장치, 재질별 자동 인식된 흑색 플라스틱 시료를 정확하게 선별/회수하기 위한 선별분리장치 및 선별 시스템을 구성하고 있는 장치 간의 전기적 신호의 변환 등을 통하여 정확한 data의 전송 및 처리와 선별 시스템을 구성하고 있는 각각의 장치를 제어하기 위한 Control unit 등으로 구성되어 있다. 본 자동선별 시스템은 파쇄된 흑색 플라스틱 시료를 시간당 약 30~50 kg의 처리가 가능하다.

흑색 플라스틱 시료를 일정한 간격으로 컨베이어 벨트 위에 정량공급 해 주면, 이동하는 컨베이어 벨트 위의 흑색 플라스틱 시료의 위치 정보 데이터를 Control unit을 통하여 LIBS 장치로 전송한다. 본 연구에서는 LIBS 장치에서 획득한 흑색 플라스틱 시료의 재질 특성 데이터를 주성분 분석법(Principal Component Analysis, PCA)과 Fuzzy Transform을 기반으로 다차원 축소 알고리즘을 결합한 Hybrid Fuzzy Transform 인공지능형 알고리즘 기반의 분류기를 개발하였다. 특

히, 방사형기저함수신경회로망(Radial Basis Function Neural Networks, RBFNNs) 분류기를 바탕으로 흑색 플라스틱의 재질을 실시간으로 분석하였다. 따라서, 분석된 플라스틱 시료의 재질 특성 data는 흑색 플라스틱을 ABS, PP, PS 등의 재질로 구분하여 Control unit으로 data를 전송하고, Control unit은 받은 data를 바탕으로 각각의 선별 분리장치를 제어하여 다양한 재질의 플라스틱 시료를 압축공기를 이용하여 각각 선별/회수한다.

3.3. 흑색 플라스틱 재질별 특성 분석

Table 4에는 Lab-scale 규모의 자동선별 시스템에 설치되어 있는 LIBS 장비의 세부사양을 나타내었으며, 레이저의 사양은 266 nm, 25 mJ, 10 Hz의 ns pulse 등이다. CCD (Charge Coupled Device) detector는 spectrum peak의 wavelength 185~1050 nm 구간을 5개로 나누어서 분석할 수 있다.

Table 5에는 자동선별 시스템에 설치되어 흑색 플라스틱의 재질별 특성을 분석하기 위한 LIBS 장비의 조

Table 4. System specification of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

Item	Contents
Laser	266 nm Laser, 25 mJ Maximum, ns pulse width, 10 Hz repetition rate maximum
Ablation spot guiding and auto focusing laser	Red laser @ 670 nm, 50 mm working range
Spectrometer	5 Channel CCD spectrometer

Table 5. LIBS analysis condition for automatic sorting system

Classification	Conditions
Laser output level	100%
Delay time	0.5 μ s
Gate Width	1.050 ms
Spot Size	50 μ m
Wavelength	185~1050 nm

건을 나타내었으며, Laser output level 100%, Delay time 0.5 μ s, Spot size 50 μ m 및 레이저 조사는 1회 실시한다. 이때 흑색 플라스틱 시료의 표면에 조사되는 Laser energy는 약 17.3+/-0.27 mJ이며, 레이저 업체에서 제공한 Aurora S/W를 기반으로 재질별 특성 데이터를 분석할 수 있다.

3.4. 인공지능형 알고리즘 분류기의 분류율

Fig. 4에는 방사형기저함수신경회로망(Radial Basis Function Neural Network, RBFNNs) 분류기의 구조를 제시하였으며, 본 RBFNNs 분류기는 전처리부, 조건부, 결론부 및 추론부로 구성되어 있다^{12,13}. 전처리부는 획득한 데이터의 정보손실을 최소화하여 고차원 특징 벡터를 저차원 특징 벡터로 차원을 축소하는 주성분분석법과 퍼지 공간 분할 및 퍼지화를 통해 데이터의 크기를 축소함 Membership function의 개수를 정하고 각 Membership function을 대표하는 값을 찾아 축소시켜주는 Fuzzy Transform 알고리즘으로 구성되어 있다. 조건부는 데이터의 특성을 최대한 반영하기 위하여 퍼지 클러스터링 방법(Fuzzy c-means clustering)을 적용하여

적합도를 계산하며, 결론부에서는 분석한 데이터의 연결가중치를 1차 선형식으로 확장하고 최소자승법을 이용하여 계수를 추정한 후 분류율을 확인한다. 추론부에서는 퍼지 추론법과 무게 중심법을 적용하여 분류기의 출력(분류율)을 계산한다. 본 인공지능형 알고리즘 분류기(RBFNNs)는 LIBS를 이용하여 획득한 흑색 플라스틱의 재질별 특성 데이터 및 파라미터 학습을 통하여 획득한 데이터 등을 입력하면 시뮬레이션을 통하여 분류기의 분류율(classification rate)을 계산하여 출력해준다.

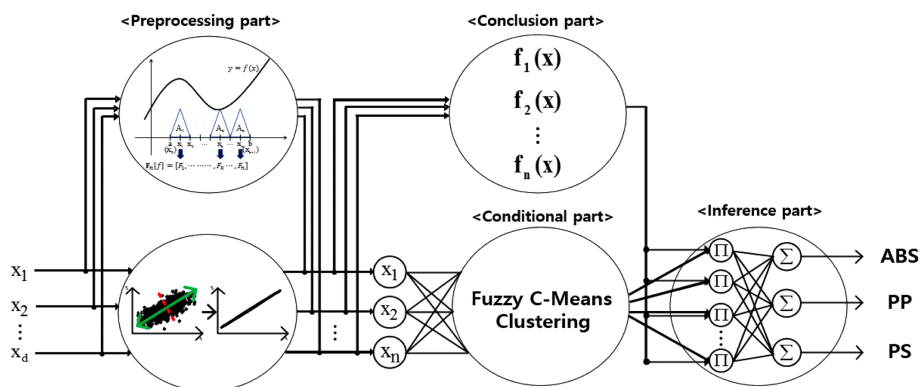
3.5. 자동선별 시스템 선별효율 평가

본 연구에서 개발된 Lab-scale 규모의 흑색 플라스틱 자동선별 시스템의 경우 투입되는 흑색 플라스틱 시료에 대한 재질의 정확한 인식과 자동선별이 매우 중요하며, 자동선별 시스템의 흑색 플라스틱에 대한 인식률과 선별효율(회수물의 품위)을 측정하였다. 실험에 사용한 시료는 경기도 H시에 위치한 민간수집업체를 통하여 확보한 폐소형가전 제품을 수작업으로 해체하여 선별한 흑색 플라스틱을 이용하였으며, 본 자동선별 시스템의 인식률과 선별효율(회수물의 순도) 실험을 위하여 30×30 mm 이상의 크기로 잘라서 사용하였다. 자동선별 시스템의 인식률과 선별효율(회수물의 품위)은 다음의 식을 이용하여 평가하였다.

$$\text{인식률}(R_n) = \frac{R_c}{R_i} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{선별효율(회수물의 품위)} = \frac{R_c}{R_c + W_c} \times 100 \quad (2)$$

여기서, R_c : 재질을 인식/판별한 회수대상 흑색 플라스틱

**Fig. 4.** Structure of RBFNN classifier for sorting of the black plastic by types.

틱 시료

R_i : 재질을 알고 있는 회수대상 흑색 플라스틱 시료

W_c : 선별 분리된 기타 흑색 플라스틱 시료

4. 실험 결과 및 고찰

경기도 H시에 위치한 민간수집업체를 통하여 확보한 폐소형가전 제품으로부터 발생하는 플라스틱 중 ABS, PP 및 PS 재질의 흑색 플라스틱 시료를 레이저유도분광분석법(LIBS)을 이용하여 분광 특성 피크(peak)를 분석하였으며, 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 흑색 플라스틱의 각 재질별로 획득한 특성 피크의 파장값(wavelength; nm)는 스펙트럼에서 확인이 가능하였으며, 각각 340~360 nm, 450~470 nm, 520~550 nm, 710~750 nm의 범위에서 위치 확인이 가능하였다.

파장값 340~360 nm에서 흑색 ABS 플라스틱의 경우 PP 및 PS와는 전혀 다른 특성의 스펙트럼이 나타났으며, 파장값 450~470 nm에서 PP와 PS의 경우 거

의 유사한 특성의 스펙트럼을 보였으나 ABS는 다른 특성의 스펙트럼이 나타났다. 파장값 520~550 nm에서 PP와 PS의 경우 강도(intensity)의 차이는 있으나 거의 유사한 특성의 스펙트럼이 나타났으며, ABS의 특성 스펙트럼은 미미하였다. 파장값 710~750 nm에서 PP 재질만 다른 재질과 구별되는 특성 스펙트럼이 나타났다. 흑색 플라스틱 각 재질별 특성 스펙트럼에서 정확한 파장값은 레이저 업체에서 제공한 Aurora 프로그램(TruLIBS™)의 Database나 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology Institute, NIST)에서 제공하는 제품과 서비스에 관한 표준 중 하나인 ASD(Atomic Spectra Database)를 이용할 경우 정확한 값을 확인할 수 있다.

퍼지집합이론은 1965년 Zadeh에 의해 처음으로 제안된 내용으로 변수가 많은 시스템에서 주로 사용된다¹³⁾. 특히 Fuzzy transform은 퍼지공간을 분할하고 각 퍼지공간마다 대표하는 값을 계산하여 퍼지공간의 개수만큼 차원을 축소시켜주는 알고리즘이다. PCA보다 연산량이 적다는 장점을 가지고 있다. LIBS를 통하여 획득

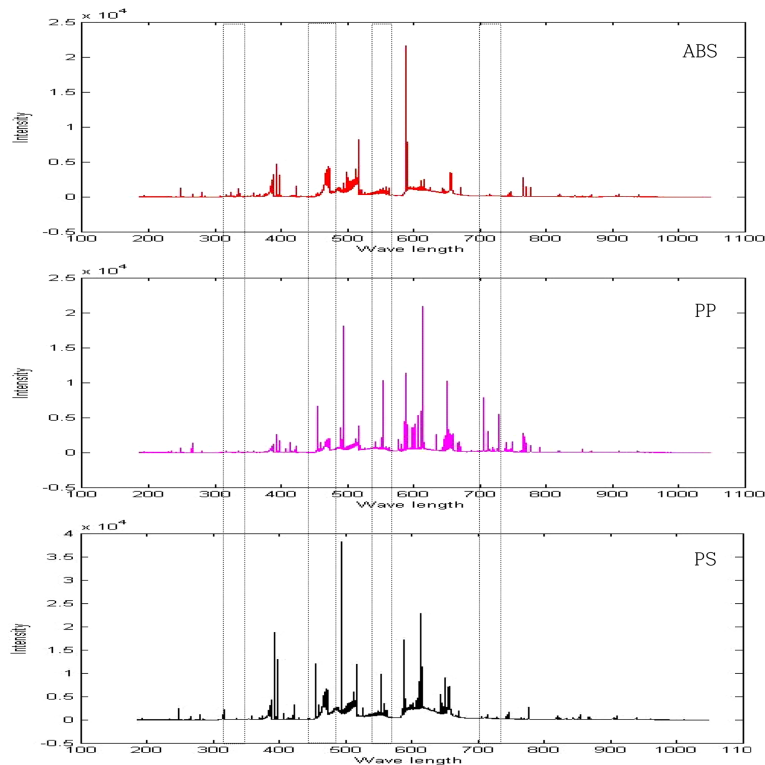


Fig. 5. LIBS spectrum of black plastics obtained from used small household appliances.

한 흑색 플라스틱의 재질별 특성 스펙트럼 데이터를 Fuzzy transform을 사용하여 스펙트럼의 노이즈를 제거하였으며, 노이즈 제거를 통해 획득한 새로운 데이터는 주성분 분석법(PCA)을 이용하여 입력변수를 축소하였다.

Table 6에는 인공지능형 알고리즘 분류기를 사용하여 분석한 분류율을 나타내었다. 인공지능형 알고리즘 분류기의 분류율은 LIBS를 통하여 획득한 흑색 플라스틱 시료의 특성 데이터를 인공지능형 알고리즘 분류기에 입력하여 시뮬레이션을 통하여 재질별 분류율을 계산하는 테스트 데이터 분류율(CR_TE)과 재질을 알고 있는 흑색 플라스틱의 특성 데이터를 이용하여 파라미터를 학습한 후 시뮬레이션을 통하여 재질별 분류율을 계산하는 트레이닝 데이터 분류율(CR_TR)로 구분된다.

Table 6에서 알 수 있듯이 주성분 분석법(PCA) 기반 RBFNNs 분류기[A]의 경우 분류율은 최대 약 97.46%, Fuzzy transform 기반의 RBFNNs 분류기[B]는 약 96.54%, 이 두 가지 분류기를 결합한 Hybrid fuzzy transform [A+B]은 분류율은 약 97.33%으로 나타났다.

본 Lab-scale 자동선별 시스템을 이용하여 선별 실험

을 수행하였으며, 흑색 플라스틱에 대한 인식률과 선별 효율(회수물의 품위)을 측정하였다. 폐소형가전 제품을 수작업으로 해체하여 선별한 흑색 플라스틱을 이용하였으며, 30×30 mm 이상의 크기로 잘라서 사용하였다. 흑색 플라스틱 시료를 일정한 간격으로 정렬하여 이동하는 컨베이어벨트에 자동으로 공급하면, 위치 자동인식장치에서 시료의 위치를 정보를 LIBS에 보내어 레이저를 조사하고 발생된 플라즈마를 분석하여 플라스틱 시료의 재질을 인식하게 된다. 이때 투입한 흑색 플라스틱시료의 개수는 총 500개이며, ABS, PP, PS 시료 각각 150개와 재질을 모르는 플라스틱 시료 50개다. 흑색 플라스틱에 대한 재질 인식 정보는 LIBS 분석용 S/W (Aurora 프로그램; TruLIBS™)에서 확인이 가능하며, 앞서 제시한 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 또한, 본 자동선별 시스템의 선별효율은 재질별로 회수된 흑색 플라스틱 시료를 조사하였으며, 앞서 제시한 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

Table 7에는 본 연구에서 개발한 Lab-scale 규모의 자동선별 시스템을 이용하여 폐소형가전으로부터 발생

Table 6. Results of classification efficiency obtained from the on hybrid fuzzy transform method

Method	MFs	D	C	CR_TR (%)	CR_TE (%)
PCA-based RBFNNs [A]	-	35	4	96.89±0.49	93.25±1.70
		40	4	97.18±0.37	93.58±1.64
		45	3	97.10±0.38	94.02±1.38
		50	3	97.46±0.43	93.88±1.49
Fuzzy transform-RBFNNs [B]	-	35	5	95.75±0.23	92.83±1.15
		40	5	96.35±0.41	93.50±1.12
		45	4	96.00±0.32	93.08±0.63
		50	4	96.54±0.31	92.75±1.20
Method	D	MFs	C	CR_TR	CR_TE
Hybrid fuzzy transform [A+B]	5500	35	4	96.58±0.51	94.16±1.08
		40	4	97.06±0.37	94.50±0.81
		45	3	97.33±0.31	94.41±1.23
		50	3	97.04±0.25	94.08±1.90

Where, Polynomial type : Linear

Method : Preprocessing method

MFs : Number of membership functions

D : Number of reduced dimensions by PCA

C : Number of clusters

CR_TR : Classification rate of training data

CR_TE : Classification rate of test data

Table 7. Results of operating tests on the lab-scale automatic sorting system

	Input	Color plastics	Black plastics	Remark
Recognition rate	500ea	< 98.0%	< 94.0%	PP : 150ea PS : 150ea ABS : 150ea Unknown : 50ea
Sorting efficiency (Grade)	500ea	< 95.0%	< 80.0%	

※ PP and PS plastics : recognition rate (< 93.0%), sorting efficiency (< 82.0%)

한 유색 플라스틱과 흑색 플라스틱에 대한 인식률과 선별효율(회수물의 품위) 실험 결과를 나타내었다. 유색 플라스틱의 경우 인식률은 약 98.0% 이상, 선별효율은 약 95.0% 이상으로 매우 높게 나타났으며, 흑색 플라스틱의 인식률은 약 94.0% 이상, 선별효율은 80.0% 이상으로 분석되었다. 그러나, 흑색 플라스틱 중 PP와 PS의 인식률은 약 93.0% 이상, 선별효율은 약 82.0% 이상으로 플라스틱 재질별로 인식률 및 선별효율에 다소 차이가 있는 것으로 확인되었으며, 시료에 대한 인식률 및 선별효율 개선을 위한 연구가 진행 중이다.

5. 결 론

폐가전제품의 발생량은 매년 크게 증가하고 있는 추세이며 따라서, 사용 후 발생하는 폐가전제품에 대한 재활용은 매우 중요한 과제이다. 특히, 폐소형가전제품의 경우 흑색 플라스틱의 함유율이 높을 뿐만 아니라 재질이 다양하여 재활용 공정에서 발생하는 플라스틱을 재질별로 선별 회수하여 재활용하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에서는 폐소형가전으로부터 발생하는 흑색 플라스틱을 재질별로 자동선별하기 위하여 레이저기술을 기반으로 한 자동선별 시스템을 개발하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기존의 플라스틱 선별기술인 비중선별, 정전선별, 근적외선분광법 및 IR/Raman 분광법 등은 플라스틱의 재질선별에 폭 넓게 이용되고 있으나, 흑색 플라스틱의 재질선별에는 일부 기술적 한계 및 단점을 가지고 있어 이를 보완하기 위하여 레이저유도붕괴분광법(LIBS)을 기반으로 한 흑색 플라스틱 재질별 자동선별 시스템을 개발하였다.

2. 본 연구에서 개발된 자동 선별시스템은 흑색 플라스틱 시료를 공급해 주는 정량 공급장치, 시료의 위치 자동인식 장치, 실시간으로 흑색 플라스틱의 재질을 인식하는 레이저유도기반분광분석(LIBS) 장치, 재질별 플라스틱류를 선별/회수하기 위한 선별분리장치 및 선별

시스템을 구성하는 장치를 제어하기 위한 Control unit 등으로 구성되어 있다.

3. 레이저유도붕괴분광법(LIBS)을 이용하여 흑색 플라스틱의 재질별 특성 스펙트럼 데이터를 획득하고, 인공지능형 알고리즘을 적용한 분류기를 개발하여 데이터 처리에 적용함으로써 흑색 플라스틱의 재질을 효율적으로 인식하고 분류할 수 있다.

4. 주성분 분석법(PCA), Fuzzy transform 및 두 가지 분류기를 결합한 Hybrid fuzzy transform 기반의 방사형기저함수신경회로망(RBFNNs) 분류기의 분류율은 각각 약 97.46%, 약 96.54% 및 약 97.33%으로 나타났다.

5. Lab-scale 규모의 자동선별 시스템의 흑색 플라스틱의 인식률은 약 94.0% 이상, 선별효율은 80.0% 이상으로 조사되었으며, 유색 플라스틱의 인식률은 약 98.0% 이상, 선별효율 약 95.0% 이상으로 조사되었다.

6. 본 연구에서 개발된 흑색 플라스틱 자동선별 시스템을 구성하는 각 설비들의 인식률 및 선별효율 등의 성능을 개선할 예정이며, 향후 본 장비의 경우 폐소형가전제품의 재활용 현장에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

This study was supported by the R&D Center for Valuable Recycling (Global-Top R&D Program) of Ministry of Environment (Project No.: 2016002250002).

References

1. Park, E. K. et al., 2017 : Analysis of Physical Characteristics of Waste Plastics Generated from Used Small Household Appliances, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng., 54(1), pp 48-56.
2. Choi, W. Z. et al., 2015 : Status and Prospects of Plastics Recycling of Used Small Household Appliances, The 13th

- International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology, Proceeding pp 592-596.
3. Park, E. K. et al., 2017 : A Basic Study on Sorting of Black Plastics of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 26(1), pp 69-77.
 4. Choi, W. Z. et al., 2016 : A Study on Physical Characteristics and Plastics Recycling of Used Small Household Appliances, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 25(1), pp 31-39.
 5. Kim, J. J. 2014 : A Study on the recycling optimization through material flow analysis of household electric appliances, pp 42-48.
 6. Choi, W. Z. and Yoon, K. D., 2012 : A Study on Physical Properties of Recyclables obtained from MSW, J. of Korea Inst. of Resources Recycling, 21(5), pp 72-78.
 7. Park, E. K. 2010 : A Study on Development of Automatic Sorting System for Recycling of Mixed Plastic Wastes, pp 29-38.
 8. Joen, H. S. et al., 2006 : The Development of Electrostatic Separation Technique for Recycling of Life Circles Waste Plastic, J. of Korea Inst. of Resources Recycling, 15(1), pp 22-38.
 9. Joen, H. S. et al., 2013 : Development of Triboelectrostatic Separation Technique for Material Separation of ABS and PS Mixed Plastic Waste, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 22(6), pp 33-40.
 10. Choi, W. Z. et al., 2015 : Development of ICT-base Automatic Sorting System for Recycling of MSW, The 3rd International Scientific Conference on Material and Waste Management (3RINCs), Proceeding pp 200-202.
 11. David A. Cremers and Leon J. Radziemski, 2006 : Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy.
 12. Kingo Azuma and Takashi Kimura 2016 : Plasma Parameters of Titanium-Based Metallic Plasma Generated by Compact-Type High-Power Pulsed Sputtering Penning Discharge, IEEE Transactions on Plasma Science, 44(12), pp 3201-3206.
 13. Park, S. B. et al., 2017 : Design of Sorting Technology of Black Waste Plastics Using Intelligent Algorithm, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 26(2), pp 46-57.

박 은 규

- 2010년 수원대학교 환경공학과 박사
- 현재 수원대학교 환경에너지공학과 연구교수

정 밤 빛

- 2007년 수원대학교 환경공학과 석사
- 현재 수원대학교 대학원 환경공학과 박사과정



최 우 진

- 현재 수원대학교 환경에너지공학과 교수
- 현재 수원대학교 부설 IT-환경융합연구센터장
- 당 학회지 제9권 1호 참조

오 성 권

- 현재 수원대학교 전기전자공학부 전기공학과 교수
 - 당 학회지 제26권 1호 참조
-