



라만분광법을 이용한 SVM 기반 흑색 플라스틱 자동 분류 시스템의 설계

Design of Automatic Classification System of Black Plastics Based on Support Vector Machine Using Raman Spectroscopy

배종수* · 오성권*[†] · 김현기*

Jong-Soo Bae, Sung-Kwun Oh[†], and Hyun-Ki Kim

*수원대학교 전기공학과

[†]Department of Electrical Engineering, The University of Suwon

요 약

수많은 플라스틱이 산업분야에 다양하게 사용되어지고 있다. 또한 많은 양의 플라스틱 폐기물들이 발생하고 있다. 재활용에 대한 연구는 환경오염 뿐만 아니라 한정된 유용한 자원이 버려지는 것을 방지하기 위해 중요한 이슈로 부각되고 있다. 이렇기 때문에 폐플라스틱의 재활용은 재사용 관점에서 주목받고 있는 실정이다. 현재 재활용 센터에서는 플라스틱의 재질을 분류하기 위해 NIR 센서를 이용한 플라스틱 자동 분류 시스템을 구축 및 운용하고 있다. 하지만 흑색 플라스틱은 여전히 분류가 되지 않는 도전적인 목표로 남아있다. 카본 블랙이 포함된 흑색 플라스틱의 경우 검정색의 특성상 NIR 장비에서 나오는 빛을 흡수하기 때문에 분류에 어려움이 있다. 본 연구는 NIR 장비 대신 흑색 플라스틱을 분류하는 방법에 대한 연구이다. 흑색 플라스틱의 정성적, 정량적 분석을 위해 Raman 분광법을 사용하였다. 또한 분류기의 인식률을 높이기 위해 데이터를 특성을 분석하고 흑색 플라스틱을 좀 더 확실하게 분류하기 위해 Support Vector Machine(SVM), 주성분 분석법(PCA) 같은 알고리즘을 이용하였다.

키워드 : 라만 분광법, 검은색 플라스틱 인식, 서포트 벡터 머신, 재활용

Abstract

Lots of plastics are widely used in a variety of industrial field. And the amount of plastic waste is massively produced. In the study of waste recycling, it is emerged as an important issue to prevent the waste of potentially useful resource materials as well as to reduce ecological damage. So, the recycling of plastic waste has been currently paid attention to from the view point of reuse. Existing automatic sorting system consist of near infrared ray (NIR) sensors to classify the types of plastics. But the classification of black plastics still remains a challenge. Black plastics which contains carbon black are not almost classified by NIR because of the characteristic of the light absorption of black plastics. This study is focused on handling how to identify black plastics instead of NIR. Raman spectroscopy is used to get qualitative as well as quantitative analysis of black plastics. In order to improve the performance of identification, Support Vector Machine(SVM) classifier and Principal Component Analysis(PCA) are exploited to more preferably classify some kinds of the black plastics, and to analyze the characteristic of each data.

Key Words : Raman Spectroscopy, Identification of Black Plastics, Support Vector Machine, Recycling

Received: May, 20, 2016

Revised : Oct, 5, 2016

Accepted: Oct, 13, 2016

[†]Corresponding authors

ohsk@suwon.ac.kr

본 연구는 환경부의 글로벌 환경기술개발사업 중 유용자원재활용기술개발사업의 일환으로 수행하였음[과제번호:2016002250002]

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. 서 론

전 세계적으로 자원 재활용을 위해 많은 노력을 하고 있는 실정이다. 재활용 관련한 산업은 선진국과 개발도상국에서 주요 산업으로 발전해 나아가고 있다. 플라스틱의 경우 많은 분야에서 사용되고 있고 우리나라의 플라스틱 생산량은 2000년대 이후부터 매년 1,000만 톤 정도로 이는 선진국과 비교해 봐도 상위권에 속하고 있다. 현재 재활용에 대한 중요성은 점점 커지고 있지만 선진국에 비해 플라스틱의 재활용률은 상당히 부족한 실정이다. 폐플라스틱의 순환 자원화를 위해 여러 공공기관과 연구소에서 폐플라스틱의 자동 선별을 위한 연구와 이를 상용화하고 있다[1]. 현재 국내 재활용 센터에서 NIR(Near Infra Red) 장비를 이용한 폐플라스틱에 대한 자동 선별 시스템을 구축하고 활용하고 있다. 하지만 흑색 플라스틱의 사용량이 꾸준히 늘어나고 있는 상황에서 NIR 장비로는 검정색의 특성상 NIR 분광장치에서 나오는 빛을 거의 모두 흡수하기 때문에 분류가 안되는 문제점이 있다. 이런 문제점을 개선하고 흑색 플라스틱의 재질별 분류율을 높이기 위해 시료에

대해 정성적, 정량적 분석이 가능한 Raman 분광기와 Support Vector Machine(SVM) 분류기, 그리고 주성분 분석법(PCA) 같은 지능 컴퓨팅 알고리즘을 이용하여 데이터를 분석하고 분류하는데 사용하였다. 본 연구에 사용된 플라스틱 재질은 흑색 페플라ستيك 중 비중을 많이 차지하는 PP, PS, PET로 화학적 분석을 통해 각 재질별로 나타나는 특성을 분석하였으며 이를 바탕으로 최적의 SVM 분류기의 입력변수를 구성하였다.

2. 라만 분광법

라만 분광법은 1928년 C.V.Raman과 K.S. Krishnan에 의해서 처음 발견된 것으로 어떤 매질에 빛 에너지를 쏘았을 때 원자들 간의 진동, 전자들 사이의 결합에 의한 상호작용에 의해 빛이 산란되어 나오는 것을 관찰하는 방법이다. 라만 산란(Raman scattering)의 종류로는 Rayleigh scattering, Stokes Raman scattering, Anti-Stokes Raman scattering 등 세 가지의 경우가 존재하고 이를 그림 1에 나타내었다.[2]

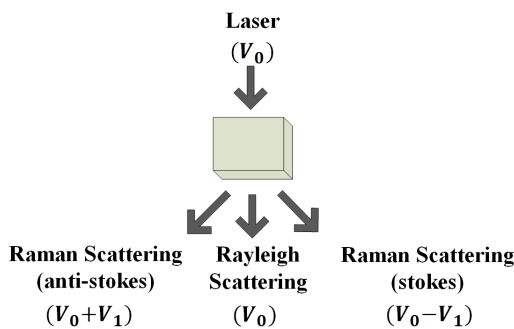


그림 1. 라만 산란
Fig. 1. Raman scattering

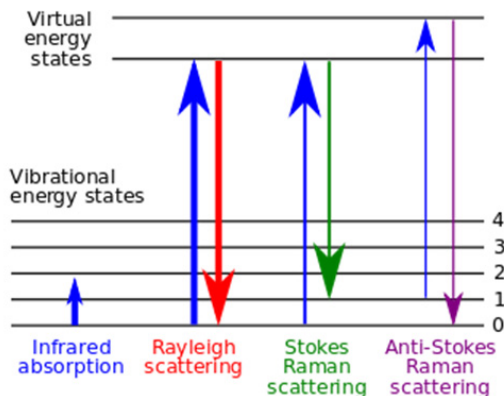


그림 2. 라만 산란 과정
Fig. 2. Process of Raman scattering

Rayleigh 산란은 입사된 빛과 분자의 에너지 상태가 변하지 않고 그대로 나오는 것을 의미한다. 하지만 Rayleigh 산란과 달리 물질에 따라 격자진동으로 포논이 흡수/방출되며 산란되어 에너지가 달라진 빛이 나오는 Stokes와 Anti-Stokes 등의 경우가 존재한다. 포논이 방출되면서 포논 에너지만큼 낮은 에너지가 산란하는 것이 Stokes라 하며 포논이 흡수되며 포논 에너지만큼 높은 에너지가 산란하는 것을 Anti-Stokes라고 부른다[3]. 이를 그림 2에 나타내었다.

3. 라만 분광기를 이용한 PP, PS, PET에 대한 화학적 분석

본 연구에서는 재질별(PP, PS, PET) 분류가 확실하게 가능한 특징들을 찾기 위해 화학적 이론을 참고하여 물질의 특성을 분석하였다.

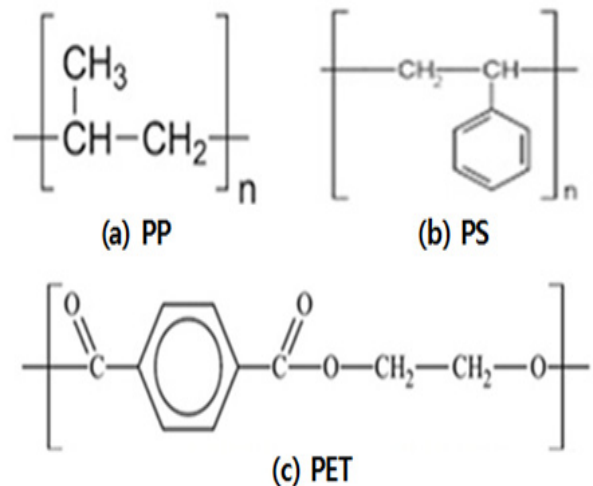


그림 3. PP, PS, PET에 대한 화학 구조식
Fig. 3. Molecular structure of materials such as PP, PS, PET

그림 3은 PP, PS, PET에 대한 화학 구조식을 나타낸 것이다. PP의 경우 화학적으로 가장 큰 특징은 Methyl group (-CH₃)으로 PS, PET에서는 볼 수 없는 특징이라고 할 수 있다. PS의 경우에는 double bonds(C=C), Benzene ring breathing mode 등이 PP, PET와 비교했을 때 PS만의 특징이라고 볼 수 있다. PET의 경우는 CO-C stretching, Carbonyl, Ring C1-C4 stretching, group(C=O) stretching 등이 두드러진 특징이라고 볼 수 있다. 아래의 표1~3은 Raman 장비를 이용해 PP, PS, PET에 대해 분석한 논문을 참조한 것이다.

표 1은 PP에 대해서 Raman 장비를 이용해 특성 분석한 논문을 참조한 것이며 그림 4는 PP에 대한 100개의 데이터 평균을 구해서 하나의 그래프로 나타낸 것이다.

표 1. 라만 장비를 이용한 PP의 적외선 스펙트럼들의 결과
Table 1. Infrared spectra results for polypropylene(PP) using Raman spectrometer; Ref. [4][5]

Frequency (cm^{-1})	Assignment
252	$\omega CH_2 + \delta CH$
321	ωCH_2
410	$\omega CH_2 + \delta CH$
458	ωCH_2
530	$\omega CH_2 + \nu C-CH_3 + \gamma CH_2$
809	$\nu CH_2 + \nu C-C + \nu C-CH$
841	$\gamma CH_2 + \nu C-CH_3$
900	$\nu CH_3 + \gamma CH_2 + \delta CH$
941	$\gamma CH_2 + \nu C-C chain$
973	$\gamma CH_3 + \nu C-C chain$
998	$\gamma CH_3 + \omega CH_2 - \delta CH$
1034	$\nu C-CH_3 + \nu C-C + \delta CH$
1102	$\nu C-C + \gamma CH_3 + \omega CH_2 + tCH + \delta CH$
1152	$\nu C-C + \nu C-CH_3 + \delta CH + \gamma CH_3$
1167	$\nu C-C + \gamma CH_3 + \delta CH$
1220	$tCH_2 + \delta CH + \delta CH + \nu C-C$
1257	$\delta CH + tCH_2 + \gamma CH_3$
1296	$\omega CH_3 + \delta CH$
1307	$\omega CH_3 + tCH_2$
1300	$\delta CH + tCH_2$
1360	$CH_3 sym ben + \delta CH$
1371	$\delta CH_3 sym ben + CH_2 wag$
1435	$\delta CH_3 asym$
1457	$\delta CH_3 asym + \delta CH_2$
2840	νCH_2
2871	$\nu CH_3 sym$
2883	$\nu CH_3 sym$
2920	$\nu CH_2 sym$
2957	$\nu CH_3 sym$

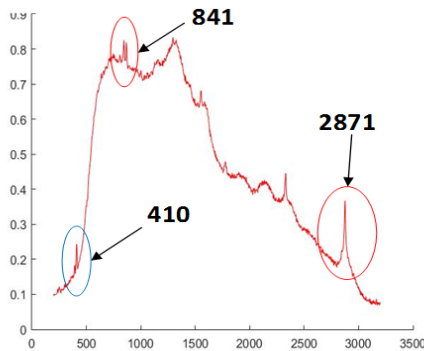


그림 4. 전체 PP 데이터 스펙트럼들의 평균
Fig. 4. Mean of spectra for entire PP dataset

표 2는 Raman 장비를 이용하여 PS에 대한 특성 분석한 논문을 참고한 것이며 그림 5는 PS에 대한 100개의 데이터 평균을 구해서

표 2. 라만 장비를 이용한 PS의 적외선 스펙트럼들의 결과
Table 2. Infrared spectra results for polystyrene(PS) using Raman spectrometer; Ref. [6][7][8]

Frequency (cm^{-1})	Assignment
457	-
621	Benzene ring vibration
785	CH_2 rocking vibration $C-C$ stretching vibration
1001	Benzene ring breathing mode
1032	$C-H$ in plane bending mode
1090	-
1155	$C-C$ stretching vibration
1312	twisting vibration wagging vibration $C-C$ stretching vibration
1602	$C=C$ vibration

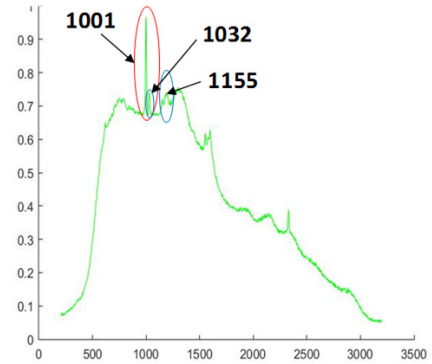


그림 5. 전체 PS 데이터 스펙트럼들의 평균
Fig. 5. Mean of spectra for entire PS dataset

하나의 그래프로 나타낸 것이다.

표 3. 라만 장비를 이용한 PET의 적외선 스펙트럼들의 결과
Table 3. Infrared spectra results for polystyrene(PET) using Raman spectrometer; Ref. [9]

Frequency (cm^{-1})	Assignment
702	Ring $C-C$ Stretching
795	Ring torsion and $C=O$ stretching
858	Ring $C-C$, ester $CO-C$
886	$O-CH_2$ and $C-C$ stretch of the gauche ethylene glycol unit
998	$O-CH_2$ and $C-C$ stretch of the trans ethylene glycol unit
1095	Ethylene glycol $C-O$ and $C-C$ stretching, $C-O-C$ bending
1125	Ester $CO-O$ and ethylene glycol $C-C$ stretching
1180	Ring $C-C$ stretching
1289	$CO-C$ stretching
1310	Ring $C-C$ stretching
1613	Ring C_1-C_4 stretching
1725	$C=O$ stretching

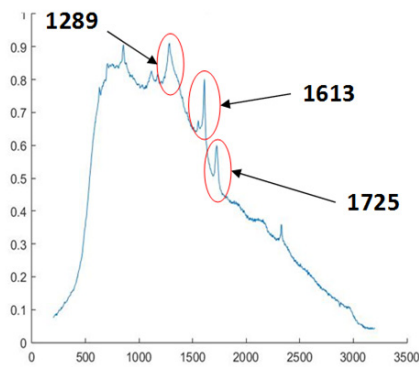


그림 6. 전체 PET 데이터 스펙트럼들의 평균
Fig. 6. Mean of spectra for entire PET dataset

표 3은 PET에 대해 Raman 장비를 이용해 특성 분석한 논문을 참고한 것이며 그림 6은 PET에 대한 100개의 데이터 평균을 구해서 하나의 그래프로 나타낸 것이다.

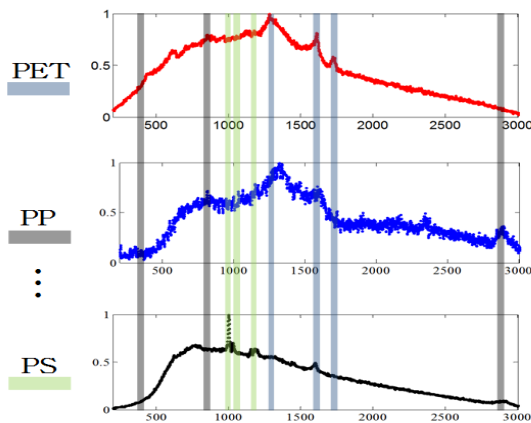


그림 7. 선택될 입력에 대한 최종 피크의 선정
Fig. 7. Decision of final peaks for input ranges to be selected

그림 7은 위의 표 1~3과 그림 4~6을 분석하여 최종적으로 결론 낸 PET, PP, PS에 대한 피크를 선정한 것이다. 각 재질별 화학적 특성을 최대한 고려하고 피크점 영역이 서로 겹치지 않도록 하나의 재질당 3개씩 총 9개의 피크를 선정하였다.

PP의 경우 $410\text{cm}^{-1}(\omega\text{CH}_2 + \delta\text{CH})$, $841\text{cm}^{-1}(\gamma\text{CH}_2 + \nu\text{C}-\text{CH}_3)$, $2871\text{cm}^{-1}(\nu\text{CH}_3 \text{ sym})$ 영역을 특성 피크점으로 선정하였다. 410cm^{-1} 의 경우 화학적 분석을 통한 선정이 아닌 추출한 PP 데이터의 그래프를 분석하여 선정하였다.

PS의 경우 1001cm^{-1} (Benzene ring breathing mode), 1032cm^{-1} (C-H in plane bending mode), 1155cm^{-1} (C-C stretching vibration) 영역을 특성 피크점으로 선정하였다. PS의 특징 중 하나인 double bonds(C=C)에 해당하는 1602cm^{-1} 영역의 경우 PET의 피크인 1613cm^{-1} 과 근접해 있기 때문에 배제하였다. 또한 PS 그래프 분석과 다른 재질과의 영역부분이 겹치지 않게 종합적으로

고려하여 1032cm^{-1} , 1155cm^{-1} 영역을 선정하였다.

PET의 경우 1289cm^{-1} , 1613cm^{-1} , 1725cm^{-1} 영역을 특성 피크점으로 선정하였다. PET의 특성인 795cm^{-1} , 858cm^{-1} 등이 더 있지만 PP의 화학적 특성과 영역이 근접해있어서 PET의 특성 피크점으로 고려하지 않았다.

3. 주성분 분석법

주성분 분석법(Principal Component Analysis)은 데이터의 정보를 최대한 유지하면서 고차원의 특징 벡터를 저차원의 특징벡터로 축소하는 기법 중 하나이다. 데이터의 크기가 큰 입력을 그대로 패턴 분류기의 학습 및 테스트로 사용할 때 학습 및 인식 속도가 느려진다. 또한 고차원의 데이터에는 잡음과 같은 분류에 방해가 될 수 있는 정보들도 포함되어있기 때문에 PCA 알고리즘을 사용하여 이런 문제점들을 해결하였다[10]. 아래의 그림 8은 주성분 분석법의 과정을 그림으로 나타낸 것이다.

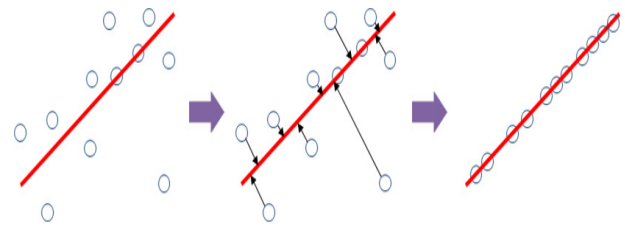


그림 8. 주성분 분석법
Fig. 8. Principal Component Analysis

다음은 PCA 알고리즘의 동작 순서를 나타낸 것이다[11].

단계 1 : 인식을 위한 학습 데이터의 집합(S)을 구성한다.

$$S = [I_1, I_2, I_3, \dots, I_M] \quad (1)$$

단계 2 : 학습 데이터의 집합(S)에서 데이터 집합의 평균(Ψ)을 계산한다.

$$\Psi = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M I_n \quad (2)$$

단계 3 : 학습 데이터와 학습 데이터의 평균의 차(Φ_i)를 계산한다.

$$\Phi_i = I_i - \Psi \quad (3)$$

단계 4 : 인식을 위해 학습 데이터에서 공분산 행렬(O)을 계산한다.

$$C = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \Phi_n \cdot \Phi_n^T = A \cdot A^T \quad (4)$$

단계 5 : 고유값 분석을 통해 공분산 행렬(C)의 고유값 행렬 (λ)과 고유벡터 행렬 U를 계산하고 가장 큰 고유값을 갖는 M'개만 선택한다.

$$C = U \Lambda U^T \quad (5)$$

단계 6 : 각 데이터와 M'개의 고유 벡터를 가지는 변환 행렬 ($W = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_{M'}]$)에서 선형변환에 의한 축소된 특징 데이터를 추출한다.

$$Y = W^T X \quad (6)$$

4. 최대 마진 분류기

최대 마진 분류기(Support Vector Machine)는 Vapnik에 의해 고안된 것으로 커널 매핑 및 최적화 기법을 이용하여 통계적 학습 방법과 융합한 알고리즘이다. SVM 알고리즘은 지도학습을 위해 사용되는 학습 모델이며 보통 분류와 예측에 많이 사용된다. SVM은 다른 분류 알고리즘에 비해 비교적 구조가 간단하면서 우수한 성능을 보이는 경우가 많은 것으로 알려져 있다. 두 클래스의 분류를 위해 최대 마진(Maximum Classification Margin)이 되도록 하는 초평면(Hyperplane)을 찾아 이에 맞게 나누는 것이다. 학습 데이터를 이용하여 초평면을 찾으며 초평면을 기준으로 하여 한쪽은 +1, 다른 한쪽은 -1로 나눈다[12].

기본적인 SVM은 선형분리 가능한 데이터에 적합한데 실제 수집되는 수많은 데이터들의 대부분은 선형 분리가 불가능한 상태이다. 이런 문제를 해결하기 위해 SVM에 여러 종류의 커널함수를 적용한다. 커널 함수의 종류로는 Linear, Quadratic, Polynomial, RBF(Radial Basis Function), Polynomial, Perceptron

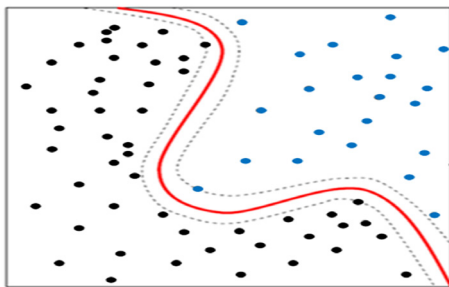


그림 9. 비선형 SVM의 예시
Fig. 9. Example of non-linear SVM

등이 있다[13].

5. 시뮬레이션 전체 개요

본 논문에서 사용된 데이터는 실제 재활용 센터에서 수집한 PET, PP, PS 3종류의 흑색 폐플라스틱이다. 각 재질별로 100개씩의 시료에 대한 데이터를 Raman 분광기를 이용해 추출하였다. 아래의 그림 10은 재질별로 화학적 이론과 데이터 분석을 통해 선정된 피크들을 나타낸 것이다. 각 재질별 3개의 특성피크를 선정하여 총 9개의 피크에 대한 정보를 분류기의 입력변수로 사용하였다. 예를 들어 PS의 특성피크로 선정된 1155cm^{-1} 부분을 확대해보면 특성 피크점 하나만을 입력변수로 사용하는 것이 아닌 특성 피크점 양옆으로 일정범위를 지정하여 입력변수로 사용하였다. Raman 장비로 측정 시 미세하게 shift될 수 있기 때문에 본 실험에서는 특성 피크점을 기준으로 양옆 5cm^{-1} 씩 범위를 지정하여 최종적으로 $1150\sim 1160\text{cm}^{-1}$ 에 해당하는 Intensity값을 입력변수로 사용하였다. 특성 피크점 한 개당 11개의 입력값을 사용하여 총 9개의 피크에 해당하는 99개의 입력값을 분류기의 입력으로 사용하였다.

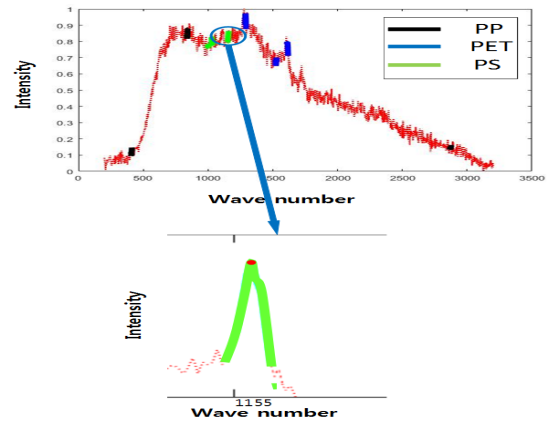


그림 10. PS 입력변수관련 선택된 포인트의 예시
Fig. 10. Example of selected points for each input variable of PS

6. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 사용된 데이터는 실제 재활용 센터에서 수집한 흑색 PET, PP, PS 시료를 수집하였다. 재질별 100개씩 총 300개의 시료를 수집 및 사용하였으며 화학적 이론과 데이터 분석을 통해 각 재질별로 3개씩 분류의 기준이 될 수 있는 특성 피크점들을 선정하였다. 또한 Raman 장비를 이용해 측정 시 피크점들이 미세하게 이동되는 경우가 발생하여 피크점 하나가 아닌 범위를

설정하여 범위 내의 모든 정보를 분류기의 입력변수로 고려하였다. 또한 본 논문에서 사용한 SVM 분류기와 비교하기 위해 동일한 조건의 입력변수를 사용하여 FCM기반 RBFNN 분류기에 대한 분류 성능도 나타내었다. 비교를 위해 사용한 FCM 기반 RBFNN에서는 구조는 일반적인 신경회로망의 구조에 기반을 두지만 은닉층 부분에서 기존 가우시안 함수 대신 FCM 클러스터링 기법을 사용함으로써 각 클러스터에 포함되는 데이터의 소속정도들이 퍼지집합의 형태로 출력되어 방사형 활성화함수 형태를 나타낼 수 있도록 하였다. 또한 퍼지화 계수는 2.0을 사용하였으며 규칙수를 2~5 사이로 변경하여 결과를 나타내었다. 표 4와 표 5 모두 5-fold cross validation을 사용하여 분류기 성능의 신뢰도를 높였다. 또한 각각의 테스트는 PCA 알고리즘을 사용하였다. 기재된 값들은 5-fold를 하여 나온 결과의 평균이며 이를 5번 테스트한 결과를 나타낸 것이다. 표에서 Training_PCR, Testing_PCR은 학습 데이터의 패턴 분류율과 테스트 데이터의 패턴 분류율을 나타낸 것이며 \pm 로 나타낸 값은 표준편차(Standard Deviation)를 나타낸 것이다. 본 논문에서 구성한 실험에서는 SVM 분류기와 RBFNN 분류기의 성능이 거의 비슷하였지만 SVM 분류율이 좀 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

아래의 표 6에는 표 5에서 가장 성능이 좋았던 Training_PCR이 97.92%이고 Testing_PCR이 95.76%인 경우의 각 클래스 별 오분류 개수를 나타내었다. PET의 경우 전체 100개의 데이터에서 9개를

틀렸고 PP의 경우는 모두 맞았으며 PS의 경우 6개를 오 분류하였다.

표 6. 각 클래스의 오분류 개수
Table 6. Number of misclassifications for each class

	PET	PP	PS
PET	91/100	4/100	5/100
PP	0/100	100/100	0/100
PS	3/100	3/100	94/100

7. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 흑색 폐플라스틱의 재질별 분류를 위한 연구를 하였다. 시료는 실제 생활계 흑색 플라스틱으로 재활용 센터에서 수집하였다. Raman 장비를 이용하여 수집된 시료들에서 데이터를 추출하였으며 화학적 이론 및 데이터 분석을 통해 특성피크를 선정하였다. 이렇게 선정된 특성피크들을 SVM 분류기의 입력변수로 사용하여 분류 성능을 확인하였다. 또한 흑색 폐플라스틱 자동 분류기를 구현함으로써 응용면에서 적용 가능성을 확인하였다. 향후 PET, PS, PP 뿐만 아니라 다른 재질의 흑색 폐플라스틱에 대한 분류를 진행하고 Raman 장비 이외에 LIBS 및 MWIR 장비와 같은 새로운 분석 장비를 이용한 데이터 추출 및 분석을 진행할 예정이다.

표 4. 화학적 피크를 고려한 RBFNN 분류기의 실험 결과
Table 4. Experiment results of RBFNN classifier by considering chemical peaks

Preprocessing	No. of chemical peaks	Peak Range	No. of Rule	Training_PCR	Testing_PCR
with PCA	9	5	2	96.08 $\pm 0.13\%$	94.33 $\pm 0.91\%$
			3	95.57 $\pm 0.35\%$	94.33 $\pm 0.57\%$
			4	95.57 $\pm 0.35\%$	94.33 $\pm 0.79\%$
			5	95.83 $\pm 0.51\%$	94.33 $\pm 0.04\%$

표 5. 화학적 피크를 고려한 SVM 분류기의 실험 결과
Table 5. Experiment results of SVM classifier by considering chemical peaks

Preprocessing	No. of chemical peaks	Peak Range	Training_PCR	Testing_PCR
with PCA	9	5	97.92 $\pm 0.42\%$	95.67 $\pm 0.91\%$
			99.96 $\pm 0.11\%$	95.23 $\pm 0.57\%$
			100 $\pm 0.00\%$	95.33 $\pm 0.79\%$
			100 $\pm 0.00\%$	95.30 $\pm 0.04\%$

References

- [1] B.D. Hardesty, W.Chris, "Eight million tonnes of plastic are going into the ocean each year". *The Conversation*, Retrieved 21 February 2015.
- [2] R.K. Khanna, "Raman-spectroscopy of oligomeric SiO species isolated in solid methane". *Journal of Chemical Physics* 74 (4): 2108. Bibcode:1981JChPh..74.2108K. doi:10.1063/1.441393, 1981.
- [3] H.S. Chung, "The Optical Analysis of Graphene-Focusing on Raman Spectrum", *Physics & Advanced Scientific Technology*, 18,7-8, p20-25, 2009.
- [4] M.A.De Baez, P.J.Hendra, M.Judkins, "The Raman spectra of oriented isotactic polypropylene", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 51,12: 2117-2124, 1995.
- [5] E.Andreassen, "Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene. In: Polypropylene", *Springer Netherlands*, p. 320-328, 1999.

[6] J. R. Anema, A. G. Brolo, A. Felten, C. Bittencourt, "Surface-enhanced Raman scattering from polystyrene on gold clusters", *Journal of Raman Spectroscopy*, 41.7: 745-751, 2010.

[7] D.H.Zhang, J.G.Qin, J.S.Shen, Y.Wang, W.J.Liu, "Study on the concentration dependence of orientation of polystyrene on silver by the sers technique", 18(2), 177-180, 2000.

[8] M.Mazilu, C.D.LAnna, A.Riches, C. S.Hemington, K.Dholakia, "Optimal algorithm for fluorescence suppression of modulated Raman spectroscopy", *Optics express*, 18,11: 11382-11395, 2010.

[9] GnoSys Global Ltd, "PET Analysis", GnoSys Global Ltd, Guildford, Surrey, TSAN11-Application notes.

[10] Peter J. B. Hancock, A. Mike Burton, and Vicki Bruce. "Face processing: Human perception and principal components analysis," *Memory and Cognition*, Volume: 24, Issue: 1, pp.26-40, 1996.

[11] S.H.Yoo, S-K.Oh, P. Witold, "Design of face recognition algorithm using PCA-LDA combined for hybrid data pre-processing and polynomial-based RBF neural networks: Design and its application", *Expert Systems with Applications*, 40,5: 1451-1466, 2013.

[12] V. Vapnik, "The Nature of Statistical Learning Theory," Springer Verlag, heidelberg, DE, 1995. T. Joachims, "SVM Light, Support Vector Machine 2008.

[13] H-S. Han, U-P. Chong, "Electroencephalogram-based Driver Drowsiness Detection System Using AR Coefficients and SVM", *Korea Intelligent information System Society journals*, 22(6), 768-773, 2012.



오성권(Sung-Kwon Oh)

1981년 : 연세대학교 전기공학과 공학사
 1983년~1989년 : 금성산전연구소(선임 연구원)
 1993년 : 연세대학교 전기공학과 공학박사
 1996년~1997년 : 캐나다 Manitoba 대학전기 및 컴퓨터 공학과 Post-Doc
 1993년~2004년 : 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 교수
 2005년~현재 : 수원대학교 전기공학과 교수
 2002년~현재 : 대한전기학회, 퍼지 및 지능시스템학회 편집위원
 2013년~현재 : Information Sciences 편집위원

관심분야 : Fuzzy System, Fuzzy-Neural Network, Automatic System, Advanced Computational Intelligence, Intelligent Control

Phone : +82-31-229-8162

E-mail : ohsk@suwon.ac.kr



김현기(Hyun-Ki Kim)

1977년 : 연세대학교 전기공학과 공학사
 1985년 : 연세대학교 전기공학과 공학석사
 1991년 : 연세대학교 전기공학과 공학박사
 1997년~2010년 : 경기지역 산학연기술지원단 단장
 1998년~2000년 : 사업기술정책연구소심의위원
 2000년~2004년 : 사단법인 산학연 컨소시엄 적국협의회 회장
 1989년~현재 : 수원대학교 전기공학과 교수

관심분야 : Automatic System and Control, Intelligent Modeling and Control

Phone : +82-31-222-6544

E-mail : hkkim@suwon.ac.kr

저자 소개



배종수(Jong-Soo Bae)

2014년 : 수원대학교 전기공학과 공학사
 2014년~현재 : 수원대학교 전기공학과 석사과정

관심분야 : 퍼지 추론 시스템, 뉴럴 네트워크, 진화론적최적화 알고리즘, Granular Computing 등

Phone : +82-31-222-6544

E-mail : inkansoo@suwon.ac.kr