

## 반응표면법을 이용한 폐자동차 범퍼 파쇄물의 색채선별공정 최적화 연구

§이 훈

한국지질자원연구원

### Optimization of Color Sorting Process of Shredded ELV Bumper using Reaction Surface Method

§Hoon Lee

*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

#### 요 약

폐자동차 범퍼 파쇄물 재활용을 위하여 색채선별법을 도입하였다. 색채선별법은 기존의 비중, 입도 차이에 의한 선별이 어려운 물질을 색상 차이를 이용한 카메라와 영상 분석기법으로 분리하는 선별법이다. 본 연구에서는 반응표면법 중 BBD (Box-Behnken Design)를 적용하여 실험을 계획하고 최적 조건을 도출하였다. 색채민감도, 피드투입량 및 입자크기의 영향을 분석하였으며, 회귀분석과 통계적인 방법에 기초하여 2차 반응 모델을 획득하였다.  $R^2$  및  $p$ -value는 각각 99.56%, < 0.001로 타당하였으며, 추정된 최적 조건은 색채민감도 32%, 피드투입 200 kg/h, 입자크기 33 mm 조건에서 94.1%의 회수율이 나올 것으로 예측하였다. 실제 실험을 통한 회수율은 93.8%로 나타나 해당 모델이 적절함을 확인하였다.

**주제어** : 폐자동차, 재활용, 플라스틱 범퍼, 색채선별, 반응표면법

#### Abstract

An color sorting technique was introduced to recycle End-of-life automobile shredded bumpers. The color sorting is a innovate method of separating the differences in the color of materials which are difficult to separate in gravity and size classification by using a camera and an image process technique. Experiments were planned and optimal conditions were derived by applying BBD (Box-Behnken Design) in the reaction surface method. The effects of color sensitivity, feed rate and sample size were analyzed, and a second-order reaction model was obtained based on the analysis of regression and statistical methods and  $R^2$  and  $p$ -value were 99.56% and < 0.001. Optimum recovery was 94.1% under the conditions of color sensitivity, feed rate and particle size of 32%, 200 kg/h, and 33 mm respectively. The recovery of actual experiment was 93.8%. The experimental data agreed well with the predicted value and confirmed that the model was appropriate.

**Key words** : End-of-life vehicle, recycling, plastic bumper, color sorting, reaction surface method

· Received : December 7, 2018 · 1st Revised : January 10, 2019 · 2nd Revised : April 11, 2019 · Accepted : April 23, 2019

§ Corresponding Author : Hoon Lee (E-mail : [hoonlee@kigam.re.kr](mailto:hoonlee@kigam.re.kr))

Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, 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.

## 1. 서 론

폐자동차의 재질별 구성은 차종이나 제조업체에 따라서 약간의 차이가 있으나 일반적으로 전체 차량 중량의 70~75%가 철을 포함한 금속이며, 나머지는 플라스틱, 고무, 섬유 등의 재질로 구성되어 있다. 이 중 주로 비금속 성분으로 구성되어 있는 폐차잔재물(ASR : Automobile Shredder Residue)의 처리가 심각한 문제이다<sup>1)</sup>. 국내외적으로 자동차 재활용 관련 규제가 지속적으로 강화되고 있으며, 2015년부터 전체 재활용률 95% 달성을 의무화하고 있어 ASR에 대한 재활용률 80% 이상 달성이 요구되며, 동시에 목표 재활용률 달성을 위한 복합선별공정 개발이 필요하다. 그러나, ASR 재료 구성비는 보통 플라스틱류 33%, 타이어를 포함한 고무류 25%, 섬유 및 스폰지 32%, 금속 4%, 유리 및 나무 4%, 토사 및 기타 17%로 매우 다양하게 구성되어 있으며<sup>2)</sup>, 분리 선별이 간단한 금속(철/비철금속 포함) 재질에 비하여, 비금속인 플라스틱 및 고무류 재질은 금속에 비해 재활용률이 낮고 관련 기술이나 인프라가 구축되어 있지 않아 많은 연구가 필요한 실정이다.

현재 ASR 재활용 기술은 크게 1) 기존의 단위 기술들을 조합하여 복합 플랜트를 구축하는 시스템에 관한 연구와, 2) 세부적인 단위 선별 기술을 디자인하고 선별 효율을 향상시키는 연구로 구분될 수 있다. 복합선별 플랜트 공정은 크게 물리적 선별과 화학적처리 공정으로 구분할 수 있다. 먼저 물리적 선별 공정으로는 폭스바겐의 SiCON공정, Argonne 선별 공정, Salyp 선별 공정, WESA-Slf 공정<sup>3,4)</sup>, Compaction and Solidification 기술<sup>5)</sup>, Witten 공정<sup>6)</sup>, Nimco 공정<sup>7)</sup> 등이 있고, 화학적처리 공정으로는 Chaparral 기술<sup>8)</sup>, Vinyloop 공정<sup>9)</sup>, Rensselaer Polytechnoc Institute 공정<sup>10,11)</sup>, Ford motor company 공정<sup>12,13)</sup>, Stake digester 공정<sup>14)</sup> 등이 존재하고 있으며 각국의 고유한 법제도와 환경에 따라 개발되었다. 반면에 단위 선별 기술 연구는 기본적으로 이전에 개발된 선광 및 제련 기술을 ASR 선별에 맞게 적용하는 방식으로 연구가 진행되어왔다. 이러한 단위 선별 기술은 전체 자동차 플라스틱의 25% 정도를 차지하고 있는 범퍼의 도색 여부가 재활용 효율에 매우 중요한 영향을 미치는 변수가 되고 있다<sup>15)</sup>. 도색된 부품의 경우 각종 화학처리를 수반하기 때문에 제거가 쉽지 않지만, 10% 내외로 낮은 비율을 차지하고 있기 때문에 손쉽게 선별이 된다면 전체 공정 재활용률 향상에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 폐자동차의 재활용률 향상을 위하여, 전량 소각 및 매립에 의해 처리되고 있는 폐자동차 범퍼 플라스틱 부분(ABS; 도색 및 비도색)을 해체 단계에서 회수하고 색채선별을 적용하여 재질분리 특성 연구를 수행하였다. 또한 반응 표면 방법(RSM, response surface methodology)을 도입해 실험을 설계하고 최적 조건을 고찰하였다. 반응 표면법은 다양한 실험 인자와 그들 간의 상호작용이 미치는 영향을 통계적으로 분석하여 최적 조건을 얻어내기 위한 방법으로 다양한 design 방법이 존재하며 이 중 Box-Behnken design (BBD)이 가장 많이 사용되고 이를 이용한 연구도 다수 진행되었다<sup>16-20)</sup>. 따라서 본 연구에서는 반응표면법 중, Box-Behnken design (BBD)을 이용하여 색채선별(color sorting)의 주요인자인 색채민감도, 시료투입량 및 입자크기의 영향을 분석하여 폐자동차 범퍼 플라스틱에 대한 색채선별의 가능성을 확인하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

### 2.1. 시료

대상 시료는 국내 S 기업에서 입수한 폐자동차의 플라스틱 범퍼로써, A) ABS 재질과 B) ABS 재질에 도색이 되어있는 재질이 각각 약 90%와 10%로 구성되어 있다. 원 시료로부터 Fig. 1과 같이 커팅밀을 이용하여 70 mm 이하로 파쇄하고, 색채선별 대상 시료로 선정하였다. 분쇄물은 Fig. 2와 같이 대부분 검은색을 나타내지만 방향지시등 및 미등 부분의 파쇄물을 황색, 또한 범퍼의 구성품이지만 FRP (Fiber-reinforced plastic)의 경우 밝은 색 섬유재질로 수순으로 미리 제거하였다. 이를 크기에 따라서 19, 26.5, 37.5, 53 mm

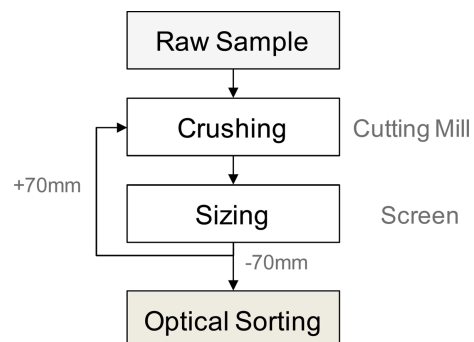


Fig. 1. Crushing process of used car bumper samples for color sorting test.

**Table 1.** Size distribution of crushed car bumper samples and proportion of painted particles in each size interval

Size, mm	Weight %	painting parts of ratio, %
+53.0	20.5	9.1
37.5 / 53	41.1	8.8
26.5 / 37.5	14.7	8.9
19.0 / 26.5	8.5	8.6
-19.0	16.7	8.5

**Fig. 2.** Shredded Bumper Plastic; 53 ~ 19 mm.

표준망체를 이용하여 해당 구간의 물질 구성비와 도색 물질 비율을 도시한 결과는 Table 1과 같다. 도시 결과 53 mm 이상의 매우 큰 입자들은 대략 20% 내외이며 반대로 19 mm 이하는 17% 정도로 나타났다. 도색 부품 비율은 53 mm 구간의 9%에서 입자가 작아질수록 감소하는 경향을 보이며, 전체적으로 8~9% 사이의 값을 갖는 것으로 확인되었다.

## 2.2. 실험방법

본 연구에서는 먼저 각 실험 인자에 따른 선별 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 실험 계획법을 수립하여 최적의 색채선별 조건을 도출하였다. A) 색채민감도의 경우, 고정된 피드(600 kg/h) 및 대표입도(31 mm) 0~100%의 민감도의 선별 특성을, B) 피드투입량은 40% 감도, 31 mm의 입도에서 시간당 200~1000 kg의 피드를, C) 입도의 효과에서는 40% 감도, 600 kg의 피드에서 3종류의 입도에 대해 선별 특성을 분석하였다.

기초 특성분석 결과를 바탕으로, 반응표면법 중 BBD 방법을 선택하여 최적 선별 조건을 고찰하였다. 색채선

별의 주요 변수는 광원의 최대치 대비 민감도(Sensitivity)와 투입되는 시료의 투입량 및 투입되는 입자의 크기이다. Table 1에 도시한 것과 같이 5종류의 입도 구간 중 아주 크거나 작은 +53, -19 mm를 제외한 3종류의 기하평균값(44, 31, 22 mm)에 기준하여, 피드 투입량 시간 당 200~1000 kg, 민감도 0~100%까지를 설정하였다. 위에서 설정된 색채 민감도, 피드투입량, 시료크기를 각각  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  라고 표기하고 최대값과 최소값의 실험범위를 (-1, 0, 1) 3 단계로 부호화하여 나타냈으며 BBD 방법에 따라 15개의 조건에 따라 실험을 수행하였다.

## 2.3. 색채선별

색채선별기는 기존의 비중, 크기 특성을 이용하는 선별기에서 제거할 수 없는 물질을 제거하기 위한 설비로써, 원료의 선별 과정에서 발생 또는 혼입된 불순물을 빛의 색채적인 반사 특성을 이용하여 제거하는 장비이다. 기존 색채선별기는 곡물선별 등 비교적 비중이 가벼운 물질에 널리 사용되어 왔으며 플라스틱 재활용을 위한 선별공정에 적용한 사례는 많지 않다. 기본적인 색채선별기의 구조는 Fig. 3와 같이, 투입되는 대상 물질에 광원을 조사 후 전면 혹은 측/후면의 카메라를 이용하여 이를 영상분석기법을 통해 압축공기에서 발생하는 공압(Air Pressure)으로 목표하는 불순물을 제거하게 된다.

본 연구에서는 국내D사에서 제작된 KB-300모델을 자동차 재활용에 맞게 변형하여 사용하였다. 수트타입에 비하여 정속이동이 가능한 벨트타입으로 설계되었으며, 피더에서 짧은 이송구간을 거친 후 바로 폭 30 cm, 길이 2 m의 벨트를 통과하여 64개의 에어건이 장착된

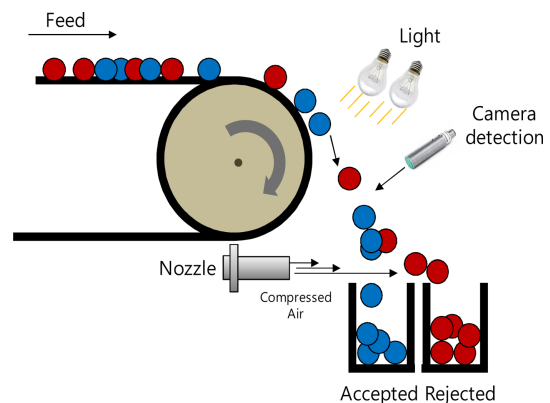
**Fig. 3.** Basic structure of color sorting machine.



Fig. 4. Photo of the color sorting machine used in the study and component explanation.

선별 준으로 낙하한다. 유저의 편의성을 위하여 대형 (12.1인치 이상)의 TFT-LCD, 65,536컬러 이상의 터치 스크린 방식을 사용하였으며 불순물의 배출에 직접적인 영향을 주는 Ejector (Air Gun)는 1,000회/초범위 내에서 작동 가능하도록 제작되다. 또한 본 연구에서 사용된 실제 색채선별기의 실제 사진을 Fig. 4에 도시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 실험인자에 따른 기초 선별 효과 분석

이번 절에서는 색채선별기를 가동할 때, 실험 결과에 많은 영향을 미치는 주요 실험인자(피드투입량, 입자크기, 색채 민감도)의 변화에 대해서 기초적인 선별 효율의 변화를 고찰하였다. 이러한 예비 실험은 효과적인 실험인자 조건을 파악하기 위한 필수적인 과정이며, 결과에 의하여 반응표면법의 인자 범위를 설정하였다.

고정 피드투입(600 kg/h) 및 입도(31 mm) 조건 A)에서 색채민감도의 변화에 따른 품위 및 회수율 기초 선별 특성을 고찰하였다(Fig. 5). 품위의 경우 모든 조건에서 98% 이상의 수치를 나타내며 대부분 깨끗한 폴리며 시료가 회수 가능함을 확인 가능하였다. 특징적으로 낮은 민감도(< 50%) 조건에서는 높은 회수율을 보이지만 50% 이상에서는 급격히 회수율이 감소하는데, 이는 높은 민감도 조건에서 순수한 검은색 플라스틱 또한 Reject 시키기 때문인 것으로 판단된다.

색채민감도와 입도를 고정시킨 조건 B)에서 피드 투입량의 변화에 따른 품위 및 회수율을 Fig. 6에 도시하였다. 모든 조건에서 높은 품위(> 98%)를 나타내었으

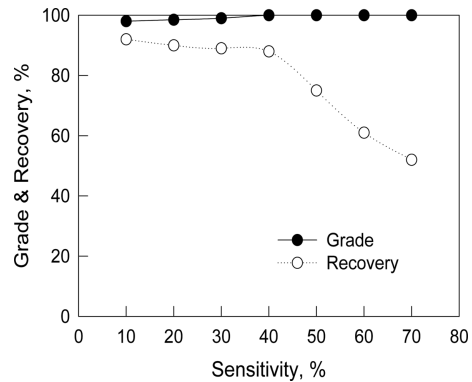


Fig. 5. Grade and recovery with various color sensitivities. (feed: 600 kg/h, feed size: 31 mm)

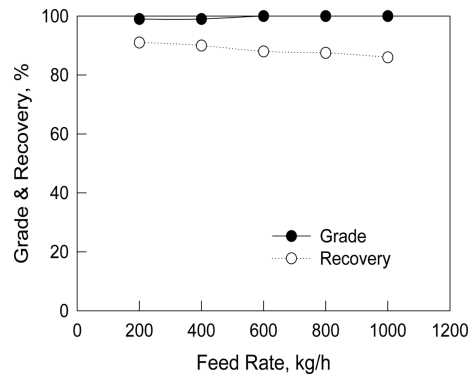


Fig. 6. Grade and recovery with various feed rate. (sensitivity: 40%, feed size: 31 mm)

며, 회수율 또한 90% 이상의 결과를 나타내었다. 일반적으로 투입이 증가할수록 장비 처리량의 한계점이 발생하기 때문에 회수율이 감소할 것을 예상하였으나, 1000 kg/h의 조건에서도 86% 이상의 값을 보여, 충분한 처리량 임을 확인하였다. 반면 고정된 색채민감도 (40%) 및 피드 투입량(600 kg/h)에서 입도크기의 영향을 파악하는 C) 실험에서는 대표 입도 31 mm를 기준, 품위 100%, 회수율 90%로 정점을 나타내며 그보다 크거나 작은 입도에서는 감소하는 특성을 보여주었다 (Fig. 7). 색채선별의 경우 입자의 크기가 너무 크거나 작은 경우 카메라의 화각에 담지 못하거나 인식이 어려운 상황이 발생한다. 또한 큰 입자의 경우 중량이 커져 에어건이 효율적으로 제거하기 어려우며, 반대로 작은 입자의 경우 병렬로 이어진 레일의 풍압에 의해서 의도하지 않았음에도 불순물뿐만 아니라 선택물 또한 동시에 제거될 확률이 크기 때문에 카메라가 분석하기에 적

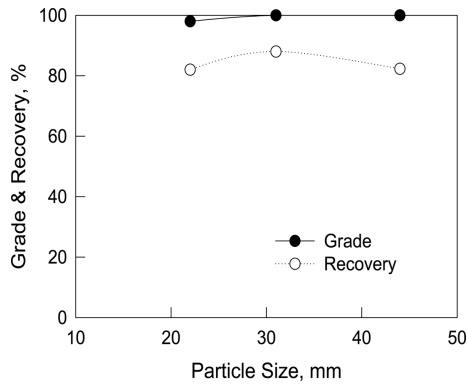


Fig. 7. Grade and recovery with various feed particle size. (feed: 600 kg/h, sensitivity: 40%)

절한 입도 선정이 매우 중요하다.

### 3.2. BBD 방법론 및 목적변수 설정

일반적으로 선별 공정의 목적은 품위,  $G$ 와 회수율,  $R$ 을 극대화하는 것이다. 그러나 이 둘은 서로 상보 관계로 높은 품위를 얻으려 할수록 회수율이 저감되는 특

징을 가지고 있다. 이러한 특징을 반영하여 일정 품위 이하의 조건에서 사용업체가 페널티를 부과하는 경우, 다음 식 (1)과 같이 종합적인 *Product Index*를 설정 가능하다.

$$Product\ index = R - \alpha(G' - G) : G' > G \quad (1)$$

$$R : G' \leq G$$

여기서  $G'$ 는 페널티 기준입계품위(Threshold grade)이며 해당 입계품위 이하의 조건에서는 상수,  $\alpha$ 를 이용하여 *Product index*를 특정 비율로 감소시키게 된다. 따라서 품위가 입계의 기준치를 대부분 상회하는 실험 조건에서 *Product index*는 회수율과 동일하게 설정 가능하다. Table 2는 각 실험 조건에서의 실험인자(감도, 피드공급량, 입자크기)와 반응설계 시 변수( $P_1, P_2, P_3$ ) 값과 이에 해당하는 실험결과를 도시한 것이다.

### 3.3. 반응표면법에 따른 결과 분석

색채민감도, 피드 투입량, 입자크기 등 3개 변수를 대상으로 BBD 반응표면법을 적용하여 3번의 중앙점을 포함하는 총 15회 실험을 설계하고 실시하였다. 동시에,

Table 2. Quality and recovery according to color sorting test conditions

Run	Exp. Values			Coded Values			R, %	G, %	R*, %
	sensitivity, %	feed rate, kg/m	feed size, mm	$P_1$	$P_2$	$P_3$			
1	10	200	31	-1	-1	0	91.9	97.4	90.7
2	70	200	31	1	-1	0	55.2	99.1	54.1
3	10	1,000	31	-1	1	0	80.0	99.4	81.1
4	70	1,000	31	1	1	0	52.4	99.9	53.6
5	10	600	22	-1	0	-1	80.8	97.6	80.9
6	70	600	22	1	0	-1	48.6	98.7	48.6
7	10	600	44	-1	0	1	82.3	98.0	82.3
8	70	600	44	1	0	1	50.5	99.5	50.4
9	40	200	22	0	-1	-1	82.0	98.4	83.2
10	40	1,000	22	0	1	-1	80.1	99.7	78.8
11	40	200	44	0	-1	1	84.2	99.4	85.4
12	40	1,000	44	0	1	1	80.8	98.1	79.7
13	40	600	31	0	0	0	86.6	98.3	87.9
14	40	600	31	0	0	0	88.1	97.4	87.9
15	40	600	31	0	0	0	89.2	98.9	87.9

R\*: Product index에 의해 예측된 회수율

실험계획법에 의한 목표변수인 회수율의 실험값과 예측값을 시행순서에 따라 Table 2에  $R^2$ 를 사용하여 추가하였다. 예측결과는 매우 잘 일치하였으며 각 변수의 코드화된 반응모델을 식 (2)에 표기하였다.

$$\begin{aligned} Rec. = & 87.97 - 16.03P_1 - 2.50P_2 + 0.79P_3 \quad (2) \\ & 17.16P_1^2 - 0.93P_2^2 - 5.26P_3^2 + 2.27P_1P_2 \\ & + 0.10P_1P_3 - 0.38P_2P_3 \end{aligned}$$

모델의 적합성을 파악하기 위해서 ANOVA분석을 수행하여 Table 3에 도시하였다. 모델 상수의 유의미를 나타내는  $p$ -value 값은 일반적인 오차기준 5%를 기준으로 판단하였다. 선형적으로  $P_1$ ,  $P_2$  및 이차식  $P_1^2$ ,  $P_3^2$ 에서 유의성이 확인되었으며, 실험인자간의 교차항목에서는 발견되지 않았다. 적합성 결여(Lack of fit) 값은 실험 요인과 반응 변수의 함수 관계를 적절하게 설명하지 못하는 경우 설정값,  $\alpha$  (통상적으로 5%) 보다 낮은값을 가진다. 본 연구에서 적합성 결여값의  $p$ -value는 0.33으로 해당 2차 모형과 실험값/예측값이 부합함을 확인할 수 있다. 또한 회귀제곱합(SSR: Regression of sum of square)과 전체 제곱합(SST: Total sum of

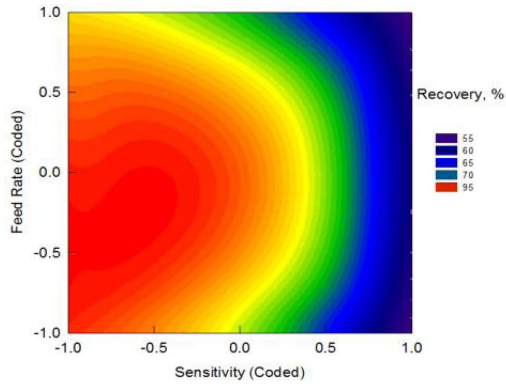
square)의 비율인 결정계수,  $R^2$ 의 수치는 전체 모델에서 설명가능한 부분을 직관적으로 표현가능한데, 본 색채 선별 모델의 경우 99.56%이며 조정결정계수,  $R^{2ad}$  또한 98.45%를 나타내어 본 연구에 사용된 2차 모델이 일반적인 유효성과 정확성을 가지고 있음을 암시한다.

#### 3.4. 반응표면법에 따른 색채선별 공정 최적화

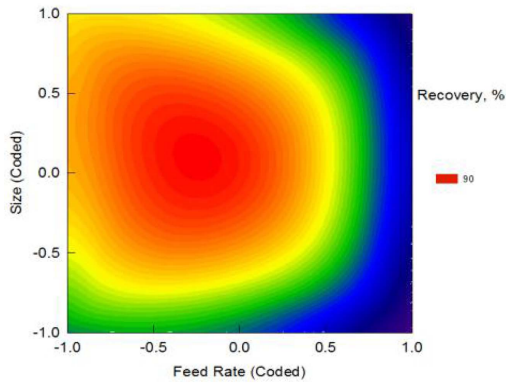
반응표면법에서 등고선도는 2차원의 평면 그래프로써, 변수의 변화 양상과 원하는 결과 값을 얻는 조건이 어디인지 개괄적으로 파악하는데 유용하게 이용된다. Fig. 8(a)는 고정된 투입입도(31 mm)에서 민감도와 피드 투입량의 등고선을 나타낸다. 피드의 투입량은 중앙점 600 kg/h의 조건에서 민감도는 남을수록 높은 회수율을 보이는 것으로 확인되었다. 반대로 높은 민감도에서는 어떠한 피드 투입조건도 특정 회수율(약 70%)를 넘어서지 못함을 확인하였다. Fig. 8(b)는 고정된 민감도(40%)에 피드 투입량과 입자크기의 등고선으로 동심원 형태를 보이며 이 범위를 벗어날수록 회수율은 감소하는 경향을 보였다. Fig. 8(c)는 고정 투입량(600 kg/h)에서 입자크기와 민감도의 결과로써 Fig. 8(a)와 유사한

Table 3. The result of variance analysis by BBD experiment design method

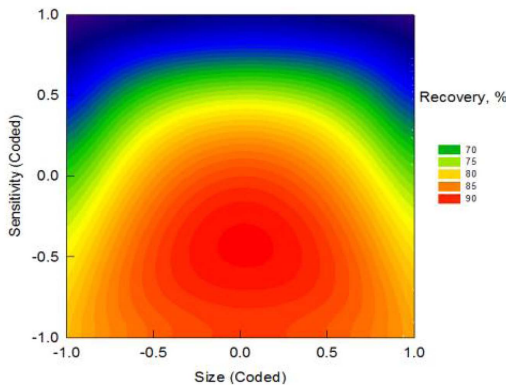
Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F-value	p-value
Regression	9	3280.2	3280.2	364.4	125.7	0
Linear	3	2112.6	2112.5	704.2	242.9	0
$P_1$	1	2057.6	2057.61	2057.6	709.8	0
$P_2$	1	50.0	50	50	17.3	0.009
$P_3$	1	5.0	4.9	4.96	1.71	0.248
Square	3	1146.3	1146.3	382.1	131.8	0
$P_1^2$	1	1043.2	1087.1	1087.1	374.0	0
$P_2^2$	1	1.0	3.22	3.22	1.1	0.34
$P_3^2$	1	102.1	102.1	102.0	35.2	0.002
Interaction	3	21.3	21.3	7.1	2.5	0.179
$P_1P_2$	1	20.7	20.7	20.7	7.1	0.044
$P_1P_3$	1	0.1	0.04	0.1	0.1	0.911
$P_2P_3$	1	0.6	0.56	0.6	0.2	0.678
Residual Error	5	14.5	14.5	2.9		
Lack-of-Fit	3	11.1	11.1	3.7	2.2	0.331
Pure Error	2	3.4	3.4	1.7		
Total	14	3294.7				



(a)



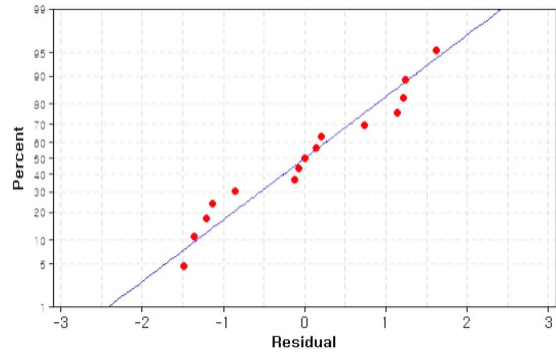
(b)



(c)

**Fig. 8.** Contour graph with various experimental cross-link combination. (a) Coded sensitivity vs. feed rate; fixed size = 31 mm. (b) Coded Feed rate vs. size; fixed sensitivity = 40%. (c) Coded sensitivity vs. feed rate; fixed feed rate = 600 kg/h

포물선 형태를 가짐을 알 수 있다. 등고선 분석결과로부터 특정 최적 조건 도출이 반응표면법 회귀분석을 통해 접근 가능함을 유추할 수 있다. 잔차분석은 모형이



**Fig. 9.** Normal probability plot for recovery.

적절한지 그리고 회귀에 대한 가정이 충족되는지 확인 가능한데, Fig. 9는 반응표면법을 이용한 회수율의 잔차의 정규확률도를 도시한 것이다. 그림과 같이 선형의 형태로 도시되며 이는 오차항이 정규분포를 가짐을 의미한다.

도출된 반응 모델 식 (2)에 근거하여 또한, 해당 색채선별기의 최적 운전조건을 획득가능하다. 회귀 방정식을 이용하여 계산된 최적화 조건은  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  인자 기준으로 -0.53, -1, 0.08이다. 이를 실제 운전조건으로 환산하면 색채민감도 32%, 피드투입량 200 kg/h, 입자 크기 33 mm로 나타났으며, 이때의 회수율은 94.1%로 예측되었다. 따라서 해당 운전조건으로(입도는 33 mm를 포함하는 체의 구간 26.5/37.5 mm를 적용) 색채선별 실험을 실시하여 얻은 품위, 회수율은 각각 98.2%, 93.8%로 회수율의 예측값과 해당 최적조건 실험값이 매우 잘 일치하였다.

#### 4. 결 론

색채선별법을 이용하여 폐자동차 범퍼 파쇄물의 물리적 선별특성을 분석한 결과, 주요인자는 색채민감도, 피드투입량, 투입입도로 설정이 가능함을 확인하였다. 전체적인 조건에서 품위는 매우 높은 값(> 80%)을 가지며, Product index는 회수율로 간단히 설정 가능하다. 각각의 인자에 대한 기초실험 결과, 높은 색채민감도의 경우 순수 흑색 플라스틱까지 제거하기 때문에 회수율을 감소시키며, 피드 투입량은 낮을수록 회수율을 증가시키지만 전체적으로 장비의 처리량에 크게 영향을 받지 않았다. 반면에 투입입자는 적절한 범위(31 mm)를 벗어나면 색채시스템의 인식문제 또는 에어건의 성능한계로 회수율을 감소시켰다. RSM의 BBD 실험계획법

을 이용한 모델에서  $R^2$  및  $p$ -value는 각각 99.56%, < 0.001로 나타나 매우 타당한 모델로 판단되었으며, 추정된 최적 조건은 색채민감도 32%, 피드투입 200 kg/h, 투입입도 33 mm의 조건에서 94.1%의 회수율을 예측하였다. 또한 실제 실험을 통한 회수율은 93.8%로 나타나 해당 모델이 적절함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 논문은 환경부 글로벌담 환경기술개발사업 중 유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호: 2016002250001).

### References

1. Lee, H. Y. and Oh, J. K., 2005 : Treatment of ASR from End-of-Life Vehicles by Air and Gravimetric Separation, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 14(2), pp.3-9.
2. Baek, S. H., et al., 2013 : Development of Triboelectrostatic Separation Technique for Recovery of Nylon from Radiator of End-of-Life Vehicle, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 22(1), pp.29-35.
3. Sattler, H. P. and Laage, B., 2000 : ASR - From waste to product, Proceedings of R'2000 Recovery Recycling Re-integration, Toronto, June, EMPA, Switzerland.
4. Zevenhoven, R. and Saeed, L., 2003: Automotive shredder residue (ASR) and compact disc (CD) waste: options for recovery of materials and energy, Energy Engineering and Environmental Protection Publications.
5. Kusaka, K. and Iida, S., 2000 : Sorting, compaction and solidification technologies for automobile shredder residue (ASR), Jsaee Review, 21(4), pp.549-554.
6. Competitive Analysis Centre, Inc., and Economic Associates, Inc., 1998 : Automotive Shredder Residue, Review of ASR – Blast Furnace Concept with European Interests, Competitive Analysis Centre, Inc., and Economic Associates Inc., American Plastics Council (APC) and the Environment and Plastics Industry Council (EPIC) of CPIA.
7. Baker, B. A., et al., 1995 : Automobile shredder residue (ASR) separation and recycling system, Google Patents.
8. Primer, A., 1997 : By-product synergy: A strategy for sustainable development, Business Council for Sustainable Development Gulf of Mexico.
9. Crucifix, P., 2005 : The Vinyloop PVC Recycling Technology—Two Years of Industrial Experience, Abstracts of Papers of 7th World Congress on Recovery Recycling and Re-integration.
10. Lynch, J. and Nauman, E., 1989 : Separation of Commingled Plastics by Selective Dissolution, Proceedings of Society of Plastics Engineers RETEC Conference.
11. Nauman, E. B. and Lynch, J. C., 1994 : Polymer recycling by selective dissolution, Google Patents.
12. Mahoney, L. R., Weiner, S. A., and Ferris, F. C., 1974 : Hydrolysis of polyurethane foam waste, Environmental Science & Technology, 8(2), pp.135-139.
13. Braslaw, J. and Gerlock, J. L., 1984 : Polyurethane waste recycling. 2. Polyol recovery and purification, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 23(3), pp.552-557.
14. Brooks, S. H. W., et al., 2003 : Stake digester process for HDPE fuel tank recycling.
15. Heidy, C. and Son, Y. G., 2014 : Development of a new technique removing paint from recycled car-bumper, Journal of the Korea Academia-Industrial, 15(5), pp.3298-3303.
16. Ferreira, S. C., et al., 2007 : Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods, Analytica chimica acta, 597(2), pp.179-186.
17. Aslan, N. and Cebeci, Y., 2007 : Application of Box-Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals, Fuel, 86(1-2), pp.90-97.
18. Maran, J. P., et al., 2013 : Box-Behnken design based statistical modeling for ultrasound-assisted extraction of corn silk polysaccharide, Carbohydrate Polymers, 92(1), pp.604-611.
19. Annadurai, G. and Sheeja, R., 1998 : Use of Box-Behnken design of experiments for the adsorption of verofix red using biopolymer, Bioprocess engineering, 18(6), pp.463-466.
20. Solanki, A. B., et al., 2007 : Formulation and optimization of piroxicam proniosomes by 3-factor, 3-level Box-Behnken design, AAPS PharmSciTech, 8(4), pp.43.

---

### 이 훈

- 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사
  - 현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
-