

연구논문

## 반응표면법을 이용한 하동 티탄철석의 건식자력선별 설계 최적화에 관한 연구

이광훈<sup>1)</sup> · 백상호<sup>1,2)</sup> · 유경근<sup>3)</sup> · 전호석<sup>1)\*</sup>

### A Study on Design Optimization of Dry Magnetic Separation on Ha-dong Ilmenite Applying Response Surface Methodologies

Kwang-Hoon Lee, Sang-Ho Baek, Kyoung-keun Yoo and Ho-Seok Jeon\*

(Received 20 January 2015; Final version Received 6 August 2015; Accepted 24 August 2015)

**Abstract :** In this study, a two factor - three level Central Composite Design (CCD) combined with response surface methodology was applied for modeling and optimization of process parameters of cross belt magnetic separation on the Ha-dong ilmenite. The magnetic intensity ( $x_1$ ) and feed rate ( $x_2$ ) were determined as independent variables, but the dependant variables of  $y_1$  : grade of  $TiO_2$  and recovery were obtained by mathematical model. It results that  $x_1$  gives great influence on the response surface model ( $y_1, y_2$ ), but the  $x_2$  does little. And it appears that the predicted values of grade and recovery applying the model equations are highly consisted with the experimental values of grade and recovery ( $R^2$  : 0.99, prob>F 0.0001). As a result, it was confirmed that the ilmenite could be concentrated to 49.09% with the recovery of 98.16%, at optimum condition as follow ; ( $x_1$  : 4,360 gauss,  $x_2$  : 10.85 g/min.) applying Minitab 17.

**Key words :** Ilmenite, Dry magnetic separation, Response surface method, Cross belt magnetic separator

**요약 :** 본 연구에서는 중심합성계획법을 이용하여 티탄철광의 건식 자력선별에서 2인자 3수준의 실험설계를 통해 변수의 최적화 및 수학적 모델을 구축하였다. 자계강도( $x_1$ )와 급광량( $x_2$ )을 독립변수로 선정하였으며, 종속 변수인  $TiO_2$ 의 품위( $y_1$ )와 회수율( $y_2$ )을 수학적 모델로 도출하였다.  $y_1$  및  $y_2$ 에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 자계강도( $x_1$ ) 이었으며, 급광량( $x_2$ )은 큰 영향을 미치지 않았다. 생성된 반응모델의 결정계수( $R^2$ , coefficient of determination)는 0.99%, prob>F는 0.0001로 매우 높은 신뢰도를 보였다. 최적의 선별조건을 찾기 위해 Minitab 17을 이용하여 최적화 시킨 결과 ( $x_1$  : 4,360 gauss,  $x_2$  : 10.85 g/min.)의 조건에서  $TiO_2$ 의 품위와 회수율이 각각 49.09%  $TiO_2$ 와 98.16%인 결과를 얻었다.

**주요어 :** 티탄철석, 건식자력선광, 반응표면법, 크로스벨트 자력선별기

## 서 론

티탄철석(ilmenite)은 철(Fe)과 티타늄(Ti)의 산화물 형태인 광물로, 금홍석(rutile)의 매장량 고갈로 인해 대부분의 티타늄 소비는 티탄철석을 정제하여 사용하고 있다(Kothari, 1974). 일반적인 티탄철석의 선별은 원광의 파·분쇄 후 비중선별법을 이용하여 규산염 광물과 같은 비중

이 낮은 광물을 제거한 후, 비중이 높은 산물을 대상으로 자력선별을 수행하여 강자성 자철석(magnetite) 및 약자성 석류석(garnet)과 같은 맥석광물을 제거함으로써, 고품위의 티탄철석 정광을 회수할 수 있다(Fan and Rowson, 2000). 특히 국내에서 채굴된 티탄철석 원광에는 자철석 및 석류석 등이 많이 수반되어 있는 것으로 확인되어, 고품위 티탄철석 정광생산을 위해서는 이와 같은 공정이 필수적으로 수행되어야한다(Lee et al., 2014).

자력선별법은 크게 건식선별과 습식선별로 구분되며, 자기장의 생성 메커니즘에 따라 영구자석(permanent magnet), 전자석(electromagnet), 전기저항솔레노이드(resistive solenoids)로 구분할 수 있다. 그리고 자기장의 세기 및 구배에 따라 저 자력 자선기(low-intensity magnetic separator), 고 자력

1) 한국지질자원연구원

2) 과학기술연합대학원대학교

3) 한국해양대학교

\*Corresponding Author(전호석)

E-mail; hsjeon@kigam.re.kr

Address; Mineral resources research Division, KIGAM

자선기(high-intensity magnetic separator) 그리고 고 구배 자선기(high-gradient magnetic separator)로 분류 된다. 해외 일부 광산에서는 습식 자력선별법을 적용하고 있으나, 대부분의 광산에서는 건식방법으로 티탄철석을 생산하고 있다(Stradling, 1991). 건식 자력선별기 중 대표적인 crossbelt-type의 자력선별기는 시료가 이동하는 mainbelt와 자기장을 만드는 solenoid, 그리고 자화된 자성산물이 부착되어 이동하는 crossbelt로 구성되어 있다. 티탄철석의 효과적인 선별을 위해서는 다양한 독립변수(independent variables)들의 영향을 정량적으로 규명할 수 있는 방법이 필요하며, 선별된 티탄철석의 품위 및 회수율을 예측하기 위해서는 실험 결과들을 통계적으로 분석하여 수식화 하는 등의 연구가 필요하다.

한편 지금까지 전통적으로 많이 사용하던 실험설계는 여러 가지의 독립변수들 중에서 한 변수를 제외한 모든 변수를 고정시키고, 한 번에 한 변수만을 변화시켜 그 효과를 관찰하는 one-factor-at-time-method가 적용되어 왔다. 그러나 이 방법에 의한 실험설계는 실험의 개수가 많을 뿐만 아니라 변수들이 상호 의존성을 지니고 있을 경우에는 실제 최적조건이라 보기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 실험설계법이 연구되고 있으며, 다구치법, 요인 배치법, 반응표면법 등이 대표적이다. 이 중 반응표면법(Response Surface Method)은 1950년 대에 Box와 Wilson에 의해 통계분야에서 처음 개발되어 화학, 생물학, 공학 등에 널리 응용되고(Park *et al.*, 2004; An *et al.*, 2010; Cho *et al.*, 2006) 있다. 뿐만 아니라 해외에서는 선광분야에도 적용하여 induced roll 타입의 자력선별 및 spiral과 같은 비중선별의 최적화에 이용되고 있으나(Tripathy *et al.*, 2014; Aslan and Cebeci, 2007), 국내에서는 반응표면법을 선광분야에 적용한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 자력선별에 영향을 미치는 인자에 대한 통계학적 해석 및 수학적 모형구축과 함께 최적화를 구현하는데 목적을 두고, 실험계획법 중 중심합성계획법을 적용하여 2요인 3수준 인자분석을 수행하였다.

### 시료 및 연구방법

본 연구에 사용된 시료는 경남 하동에 위치한 하동 티탄철광산에서 채취한 것으로, Lee 등(2014)이 수행한 연구결과에서 마지막 단계인 cross belt 자력선별 공정을 최적화하였다. Fig. 1과 같이 원광석을 조크러셔와 콘크러셔로 파쇄한 뒤, 체가름으로 5 mm이하로 시료를 제조하였다.

비중 선별법을 이용하여 파쇄과정에서 발생한 미립자 및 저비중 광물을 제거한 TiO<sub>2</sub> 38%인 시료를 사용하였다. Lee 등(2014)의 연구결과에 의하면, 비중선별에서 회수된

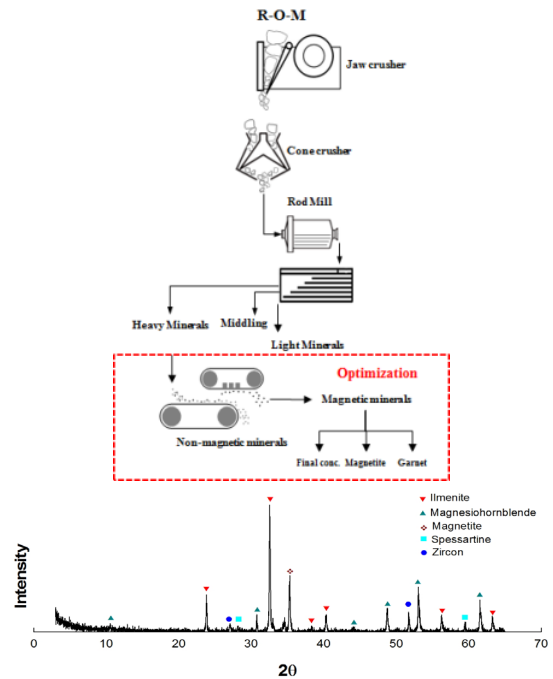


Fig. 1. X-ray diffraction of heavy mineral by gravity separation.

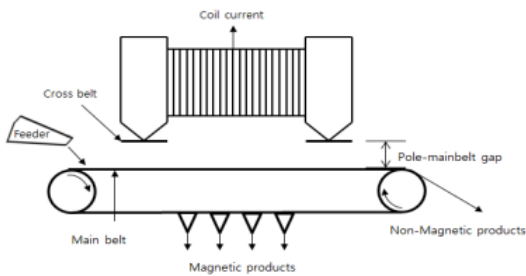
중광물에는 TiO<sub>2</sub>가 약 6배 농축된다고 알려져 있다. Fig. 1은 비중선별에서 회수된 중광물의 X선 회절 분석(X-Ray Diffraction) 결과를 나타낸 것으로, 비중 3.5 이상의 고비중 광물만 존재하였다. 그리고 지르콘을 제외한 모든 광물이 자성을 가지고 있어, 티탄철석만을 선택적으로 회수할 수 있는 자력선별 최적화 기술이 필요함을 알 수 있다.

### 건식 크로스벨트 자력선별기

건식 크로스벨트 자력선별(cross belt magnetic separation, 이하 CBMS)은 선별 공정이 비교적 간단하고 선별효율이 높아 함철광물을 선별하는데 널리 이용되며(Andrew, 1994), 광물 고유의 자화율(magnetic susceptibility) 차이를 이용하여 선별한다. Table 1은 대표적인 광물의 화학식 및 자화율을 나타낸 것으로, 휘석, 각섬석 등과 같이 화학식이 복잡한 광물은 자화가 2,000 - 1,300 gauss까지 넓은 범위에서 이루어지고, 자철석, 티탄철석과 같은 상자성 광물은 비교적 낮은 자계에서 자화되는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 CBMS의 모식도를 나타낸 것으로, 자기장을 생성시키는 자석과 시료가 이동하는 메인벨트(mainbelt), 자화된 광물이 부착되어 이동하는 크로스벨트(crossbelt) 그리고 시료를 일정한 속도로 투입시킬 수 있는 급광기(feeder)로 구성되어 있다. 자석은 500 ~ 13,000 gauss까지 변화시킬 수 있는 전자석이다. Andrew(1994)의 연구결과에 의하면 CBMS

**Table 1.** Magnetic susceptibilities of minerals

Minerals	Chemical composition	Magnetic susceptibilities (Gauss)
Augite	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	2,000 - 13,000
Biotite	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> ·Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	2,000 - 12,000
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	>17,000
Chlorite	(Mg,Fe,Al) <sub>12</sub> (Si,Al) <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>16</sub>	1,000 - 9,000
Hematite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,500 - 5,000
Hornblende	Ca <sub>2</sub> Na(Mg,Fe) <sub>4</sub> (Al,Fe,Ti) <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1,000 - 9,000
Ilmenite	FeTiO <sub>3</sub>	2,500 - 4,000
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	<1,000



**Fig. 2.** Schematic diagram of one-stage crossbelt magnetic separator.

를 사용한 광물의 선별에서 중요한 변수는 자계강도(magnetic intensity), 급광량(feed rate), 그리고 자석과 메인벨트와의 간격(pole-mainbelt gap)이다. 본 연구에서는 자석-메인벨트 간격을 0.5 cm로 고정하고 자계강도와 급광량을 변화시켜 최적화 실험을 수행하였다.

**반응표면법**

반응표면법은 여러개의 설계변수  $x_1, x_2, x_3 \dots x_k$ 가 복합적인 작용을 하여 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다(Aslan, 2008). 반응표면의 생성은 복잡한 시스템을 가진 공학 문제의 오차를 제거하고 적은 계산 시간으로 시스템에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 찾아내어 설계자에게 설계변수들 간의 상호작용을 알 수 있게 해준다. 대부분의 경우에 반응함수 F는 Taylor 급수 전개를 기본으로 하는 근사함수 y로 취급되며, 1차 또는 2차의 다항식 모형으로 나타 낼 수 있다. 2차 다항식 모델은 다양한 함수의 모양을 표현 할 수 있을 뿐만 아니라 근사 다항식의 계수를 쉽게 구할 수 있으며 많은 연구자들에 의하여 그 유효성이 검증되었다(Kim and Hong, 2005; Park et al., 2005). 2차 다항식 모델은 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

여기서  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ 는 설계변수,  $\beta$ 는 회귀계수,  $\epsilon$ 은 응답의 통계적인 오차항으로, 평균이 0이고 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 정규분포로 가정한다. 식 (1)의 근사함수로부터 n개의 실제 관측한 자료에서 추정된 함수 y는 행렬의 형태로서 식 (2)와 같이 정리 할 수 있다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (2)$$

여기서 X는 설계변수의 행렬,  $\beta$ 는 회귀계수의 벡터,  $\epsilon$ 은 오차벡터이다. 회귀계수의 벡터  $\beta$ 는 임의의 오차 제곱합을 최소로 하는 최소자승법을 이용하여 추정 할 수 있으며, 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다. 여기서 행렬  $X^T$ 는 행렬 X의 전치행렬이다.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3)$$

**실험결과 및 고찰**

**반응표면법의 적용**

설계영역 안에서 설계변수와 반응값 사이의 관계식을 구하기 위한 방법으로 중심합성법(central composite method), 요인설계법(factorial design), 회전계획법(rotatable design), 심플렉스법(simplex design) 등이 있다. 독립변수가 n개인 회귀모델은 심플렉스법이나 요인배치법 등으로는 변수의 수준 변화에 따라서 발생하는 반응함수값의 변화를 감지할 수 없는 경우가 종종 발생하므로, 회귀계수를 적절히 추정하기 어려운 경우가 있다. 이런 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 반응표면을 추정하기 위하여 중심합성법이 사용된다. 중심합성법에서는 중심점의 수는 제한 없이 하나

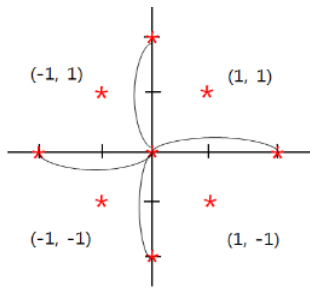


Fig. 3. Central composite method. (n=2)

Table 2. List of variables at different levels

No.	Variables	Levels		
		Low (-1)	Center (0)	High (+1)
1	Magnetic intensity, Gauss ( $x_1$ )	1,000	3,000	5,000
2	Feed rate, g/min. ( $x_2$ )	5	10	15

이상이면 가능하고, Fig. 3은 독립변수가  $n$ 개인  $2^n$  요인실험의 중심합성에 대한 예를 나타낸 것이다.

본 연구에 적용된 독립변수는 자계강도( $x_1$ ), 급광량( $x_2$ )이고, 반응함수로는  $\text{TiO}_2$ 의 품위( $y_1$ ), 회수율( $y_2$ )로 각각 결정하였다. 각 변수의 설정범위는 Lee 등 (2014)의 연구내용을 참조하여 영향을 미치는 변수와 그 범위를 선정하여

Table 2에 나타내었다. 중심합성계획법을 이용하였으며 이 실험 결과는 Mintab 17(Minitab Inc., USA)를 사용하여 통계처리 하였다.

### 반응표면분석에 의한 반응모델 추정

Table 2에서 제시한 독립변수와 실험설계법에 의해 설정된 독립변수들의 조합에 따라 자력선별을 실시하고, 생산된 티탄철석 정광의  $\text{TiO}_2$  품위 및 회수율을 Table 3에 나타내었다. 품위의 최대값은 변수 자계강도( $x_1$ ), 급광량( $x_2$ )이 둘 다 레벨(0, 0)일 때 48.5%  $\text{TiO}_2$  로 최대값을 나타내었고, 변수조합 (-1, 1)에서 22.7%  $\text{TiO}_2$  로 최소값을 보였다. 회수율의 최대값은 (1, 0)에서 99.1%로 가장 높은 수치를 나타내었고, (-1, -1)에서 2.5%로 가장 낮은 값을 보였다.

측정치에 대한 각각의 인자들이 주는 효과를 해석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(A)는  $\text{TiO}_2$ 의 품위에 대한 주 효과(main effect)의 그래프이다. 반응결과( $y_1$ )에 미치는  $x_1$ (magnetic intensity)의 경우 (-1: 1,000 gauss)에서 (0: 3,000 gauss)로 갈수록  $\text{TiO}_2$ 의 품위는 향상되었으나,  $x_1$ 의 값이 (1: 5,000 gauss)로 증가되면 품위는 다시 감소하였다. 그러나  $x_2$ (feed rate)의 경우에는 모든 구간(-1, 0, +1)에서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 4(B)는 회수율에 대한 반응결과( $y_2$ )에 미치는 주 효과의 결과로  $x_1$ 이 증가함에 따라 증가하였고,  $x_2$ 의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 3에 나타난 결과와 식 (1), (2), (3)을 이용하여 티탄철석 정광의  $\text{TiO}_2$  품위( $y_1$ ) 및 회수율( $y_2$ )에 대한 반응표면 모델을 식 (4)와 (5)에 제시하였다. 반응함수  $y$ 는 2차 반응

Table 3. Experimental results along with the operating levels

Test No.	Conditions		Observed results	
	$x_1$	$x_2$	Grade ( $\text{TiO}_2\%$ )	Recovery (%)
1	1	0	46.0	99.1
2	0	0	46.2	75.7
3	1	1	45.7	99.0
4	0	0	47.8	78.6
5	0	0	48.5	77.9
6	1	-1	45.3	99.0
7	0	0	47.1	78.5
8	-1	-1	24.3	2.8
9	0	-1	47.0	77.8
10	0	0	47.3	78.7
11	-1	0	22.9	2.7
12	0	1	46.0	79.3
13	-1	1	22.7	2.1

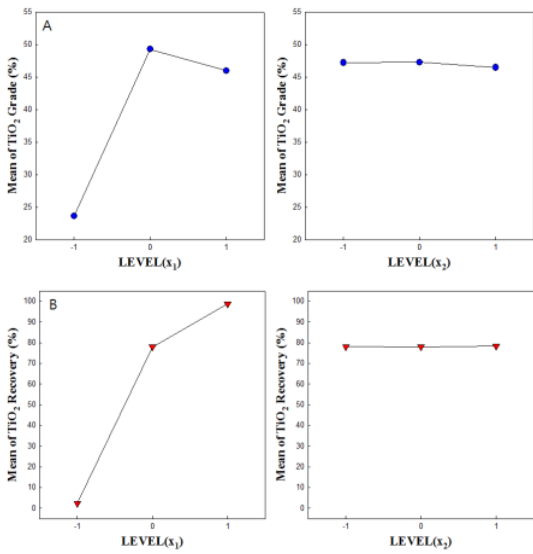


Fig. 4. Main effect plot for y<sub>1</sub> (A) and y<sub>2</sub> (B).

모델을 선택하였다.

$$y_1(\text{Grade}) = 47.25 + 11.18x_1 - 0.37x_2 - 12.48x_1^2 - 0.43x_2^2 + 0.5x_1x_2 \quad (4)$$

$$y_2(\text{Recovery}) = 78.00 + 48.25x_1 + 0.13x_2 - 27.39x_1^2 + 0.26x_2^2 + 0.17x_1x_2 \quad (5)$$

**반응모델의 적합성 평가**

Table 4는 2요인-3레벨 반응표면분석을 통해 얻어진 모델의 적합성을 알아보기 위해 분산분석(analysis of variance)을 수행한 결과를 나타낸 것이다. Prob>F 값은 보통의 경우 0.05 이하면 그 모델이 적합하다고 판단한다(Tripathy et al., 2014). 본 연구에서 제시한 모델의 P값은 품위와 회수율 모두 <0.0001로 0.1% 이하의 매우 높은 유의성을 나타내었다. Fig. 5는 모델에서 계산한 예측값과 실험에서 측정

Table 4. Analysis of variance (ANOVA) for grade and recovery

Statistics	Grade (TiO <sub>2</sub> %)	Recovery (%)
Sum of square	1269.33	16374.6
Mean sum of square	253.87	3274.91
F-value	448.62	2876.78
Prob>F	<0.0001	<0.0001
R <sup>2</sup>	0.99	0.99

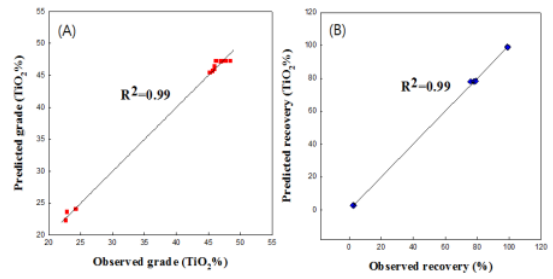


Fig. 5. Relation between predicted and observed values : (A) grade (TiO<sub>2</sub>%), (B) Recovery (%) of the magnetic fraction of CBMS.

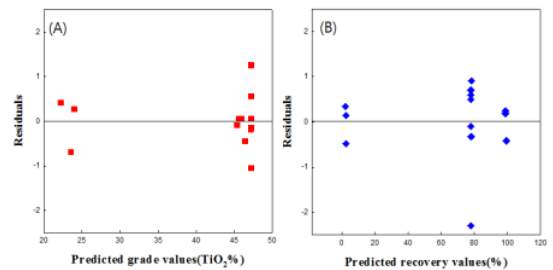


Fig. 6. Residual plot of model for error values: (A) Grade, scatter plot of the residuals and predicted, (B) Recovery, scatter plot of the residuals and predicted.

된 실측값의 관계(relationship)를 알아보기 위한 결정계수를 나타낸 것으로, 정광의 품위(TiO<sub>2</sub>%) 및 회수율(%)의 R<sup>2</sup>값은 두 반응값 모두 99%로 종속변수 변이의 99%를 설명이 가능한 매우 높은 기여율을 보였다. ANOVA 분석을 통해 제시된 모델이 적절함을 알 수 있다.

TiO<sub>2</sub>의 품위(y<sub>1</sub>)와 회수율(y<sub>2</sub>)에 대해 선택된 모델의 적절성을 진단하기 위하여 Fig. 6에 표준화 잔차와 예측값의 산점도를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub> 모델 모두 산점도가 ±2 이내의 수평밴드 내에서 위·아래에 고르게 분포되어 있어 불편성(unbiasedness)을 만족한다고 볼 수 있으며, 퍼져 있는 정도가 X축을 따라서 비슷하므로 등분산성도 만족한다고 생각되었다. 따라서 오차의 등분산성을 만족하면서 선택된 모형이 적절함을 알 수 있다(Kim and Park, 2011).

**최적반응조건 결정**

Fig. 7은 최적 반응조건을 결정하기 위해 추정된 반응표면 모델식을 이용하여 TiO<sub>2</sub>의 품위(a), 회수율(b)에 관한 3D 반응표면도를 작성하였다. 추정된 반응표면 모델식과 반응표면도를 이용하여 반응변수를 최적화하는 최적공정 조건을 구할 수 있다. 이를 보다 정량화하기 위하여 만족도

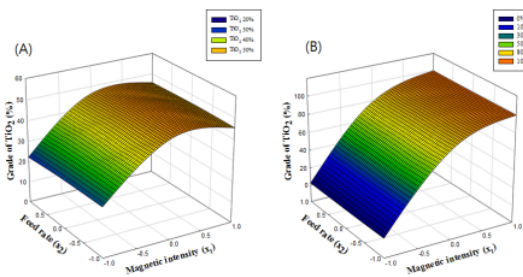


Fig. 7. Response surface plot (3D) for (A) TiO<sub>2</sub> grade, (B) TiO<sub>2</sub> recovery.

함수(desirability)를 이용하여 최적반응조건을 도출하였다(An *et al.*, 2010). 본 연구에서는 반응변수들은 클수록 좋은 경우라 가정하여 Minitab 17(Minitab Inc., USA)의 다중 반응 최적화 모듈의 망대특성의 만족도 함수를 사용하여 최적화 범위를 도출하였다.

위의 내용을 바탕으로 Minitab 17를 이용하여 최적화 시킨 결과  $y_1$ 의 경우 최대값은 49.77% TiO<sub>2</sub>를  $x_1$  (3,900 gauss),  $x_2$  (9.15 g/min.)에서 얻을 수 있고,  $y_2$ 의 경우 최대값은 99.8%를  $x_1$  (4,700 gauss),  $x_2$  (15 g/min.)에서 얻을 수 있다는 결과를 얻었다. 그리고 선광분야의 특성상 품위와 회수율 둘 다 만족 할 수 있는 변수의 조합은  $x_1$  (4,360 gauss),  $x_2$  (10.85 g/min.)에서 품위 49.09% TiO<sub>2</sub>, 회수율 98.16%를 얻을 수 있다는 결과를 얻었다.

## 결 론

본 연구에서는 cross belt type 자력선별에서 티탄철석의 품위와 회수율에 영향을 미치는 인자에 대한 유의인자선정 및 수학적 모델 구축과 함께 최적화를 구현하는 것을 목적으로 반응표면 분석법 중 중심합성설계법을 이용하여 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자력선별에 의한 TiO<sub>2</sub>의 품위와 회수율에 대하여 반응표면분석을 적용하여 얻은 모델 예측식을 도출한 결과 모델( $y_1, y_2$ )에 대한 유의확률이  $p < 0.0001$ 으로 0.1% 이하의 높은 유의성을 나타냈으며,  $R^2$  값도 0.99로 종속변수 변이의 99%를 설명이 가능한 매우 높은 기여율을 보였다.
2. cross belt type 자력선별에서 측정치에 대한 각각의 인자들이 주는 효과 및 인자들의 교호작용을 분석한 결과 반응모델  $y_1, y_2$  모두 magnetic intensity (gauss)에 크게 지배적으로 작용하였으며, feed rate (g/min.)에 의한 효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

3. 본 연구에서  $y_1, y_2$ 의 모델에 대한 반응조건 최적 선별 조건을 찾기 위해 다중 반응최적화 모듈을 사용한 결과  $y_1 : (x_1, x_2) = (3,900 \text{ gauss}, 9.15 \text{ g/min.})$ 에서 49.77% TiO<sub>2</sub>를 얻을 수 있고,  $y_2 : (x_1, x_2) = (4,700 \text{ gauss}, 15 \text{ g/min.})$ 에서 99.8%를 얻을 수 있는 것으로 확인되었다. 그리고  $y_1$  및  $y_2$  모두를 최적화 시키는 변수의 조합은  $(x_1, x_2) = (4,360 \text{ gauss}, 10.85 \text{ g/min.})$ 에서 품위 49.09% TiO<sub>2</sub>, 회수율 98.16%를 얻을 수 있었고, 모형의 검증결과 매우 높은 신뢰성을 보였다.

## 사 사

본 연구는 지식경제부 에너지·자원기술개발 사업의 일환으로 국내 희유금속자원 탐사 및 활용기술 개발을 목적으로 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- Andrew, W.S., 1994, "A theoretical analysis of particle trajectories in a crossbelt magnetic separator," *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 42, No. 1-2, pp. 1-13.
- An, S.W., Chio, J.Y., Cha, M.H. and Park, J.W., 2010, "Adsorption characterization of Cd by coal fly ash using response surface methodology" (RSM), *J. of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 11, No. 1, pp. 19-26.
- Aslan, N. and Cebeci, Y., 2007, "Application of box-behnken design and response surface methodology for modeling of some turkish coals," *Fuel*, Vol. 86, No. 1-2, pp. 90-97.
- Aslan, N., 2008, "Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration," *Powder Technology*, Vol. 185, No. 1, pp. 80-86.
- Cho, I.H., Lee, N.H., Chang, S.W., An, S.W., Yoon, Y.H. and Zoh, K.D., 2006, "Analysis of characteristics and optimization of photo-degradation condition of reactive orange 16 using a box-behnken method," *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 28, No. 9, pp. 917-925.
- Fan, X. and Rowson, N., 2000, "The effect of Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> on ilmenite flotation," *Minerals Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 205-215.
- Kothari, N., 1974, "Recent developments in processing ilmenite for titanium," *International Journal of Mineral Processing*, 1, pp. 287-305.
- Kim, D.S. and Park, Y.S., 2011, "Optimization of air-plasma and oxygen-plasma process for water treatment using

- central composite design and response surface methodology,” *J. of the Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 7, pp. 907-917.
- Kim, S.I. and Hong, J.P., 2005, “Optimum Design by Response Surface Method”, *World of Electricity*, Vol. 54, No. 9, pp. 24-28.
- Lee, K.H., Beak, S.H., Choi, H.K. and Jeon, H.S., 2014, “Development of separation process for utilization of low grade ilmenite ore,” *J. of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol 51, No. 4, pp. 503-512.
- Stradling, A., 1991, “Development of a mathematical model of a crossbelt magnetic separator,” *Minerals Engineering*, Vol. 4, No. 7-11, pp. 733-745.
- Park, J.S., Yoon, J.H. and Im, J.B., 2004, “Optimal design of a satellite structure by response surface method,” *J. of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 32, No. 1, pp. 22-28.
- Park, J.S., Jeon, Y.S. and Im, J.B., 2005, “Effect of various regression functions on structural optimizations using the central composite method,” *J. of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 33, No. 1, pp. 26-32.
- Tripathy, S.K., Ramamurthy, Y. and Kumar, C.R., 2010, “Modeling of high-tension roll separator for separation of titanium bearing minerals,” *Powder Technology*, Vol. 201, pp. 181-186.
- Tripathy, S.K., Banerjee, P.K. and Suresh, N., 2014, “Separation analysis of dry high intensity induced roll magnetic separator for concentration of hematite fines,” *Powder Technology*, Vol. 264, pp. 527-535.

---

## 이 광 훈

현재 한국지질자원연구원  
(本學會誌 第51卷 第4号 参照)

---



---

## 유 경 근

현재 한국해양대학교 에너지자원공학과 부교수  
(本學會誌 第51卷 第3号 参照)

---



---

## 백 상 호

현재 과학기술연합대학원 대학교 자원순환공학 박사과정  
(本學會誌 第52卷 第3号 参照)

---



---

## 전 호 석

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원  
과학기술연합대학원 대학교 자원순환공학과 교수  
(本學會誌 第52卷 第3号 参照)

---