

# 다구찌 방법을 이용한 밀스케일 재활용에 대한 공정변수의 최적화

백석흠\*, 홍순혁#, 주원식\*\*, 김창기\*\*\*, 정유엽\*\*\*, 신상운\*\*\*\*

## Optimization of Process Parameters for Mill Scale Recycling Using Taguchi Method

Seok Heum Baek\*, Soon Hyeok Hong#, Won Sik Joo\*\*, Chang Kee Kim\*\*\*, Yu Yeob Jeong\*\*\*  
and Shang Woon Shin\*\*\*\*

### ABSTRACT

With society focusing more and more on environmental issues, the recycling of materials of all types has become an important concern. In this paper, optimization method is developed for reducing cost and improving quality in mill scale recycling. An experimental investigation into the process parameter effects is presented to determine the optimum configuration of parameters for performance, quality and cost. Taguchi's optimization approach was used to obtain the optimal parameters. The significant parameters were identified and their effects on mill scale recycling were studied. As a results, a confirmation experiment with the optimal levels of process parameters was carried out in order to demonstrate the effectiveness of the Taguchi method.

**Key Words** : Optimization (최적화), Taguchi Method (다구찌 방법), Successive Approximation (축차근사법), Pareto Chart (파레토차트), Missing Value (결측값), Mill Scale (밀스케일)

### 1. 서론

밀스케일(mill scale)은 다양한 철강공정에서 냉각제인 수분과 혼합된 형태의 부산물로 발생된다.

이것은 철의 순도가 70 %~75 % 정도 되지만 재활용 공정(recycling process)을 통해서 회수되기 보다는 산화철 형태의 산업 폐기물로 아주 저렴한 가격에 판매된다. 대부분 용광로용 철광석 펠릿(pellet)

제조의 원료로 다시 사용되거나 전로(ladle convertor)의 냉각제로 재사용된다.

하지만 최근 철강 원자재 가격상승과 폐기물 자원화 기술의 관점에서 철의 순도가 높은 밀스케일을 이용한 직접 환원철(direct reduction iron: DRI)을 생산해서 선철(pig iron)로 회수하는 재활용 공정<sup>1,2</sup>의 개발이 많은 관심의 대상이 되고 있다.

밀스케일의 재활용 문제점은 직접 환원공정에

접수일: 2007년 5월 2일; 게재승인일: 2007년 11월 23일

\* 동아대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자 : 부경대학교 산업과학기술연구소

E-mail: shhong@pknu.ac.kr Tel. (051)620-1291

\*\* 동아대학교 기계공학과

\*\*\* (주)동아 이엔씨

\*\*\*\* 양산대학 전기전자기계

적합한 강도를 가지는 결합제(binder) 및 배합비율과 금속화율(metallization)에 소요되는 공정비용에 충분한 경제성이 있어야 한다는 점이다. 이를 위한 경제적인 럼프(lump) 상태의 성형공정을 위해 공정변수 민감도 해석(sensitivity analysis)이 요구된다.

따라서 본 연구는 선철 공정비용과 효율개선 방향을 결정하기 위해 다구찌 방법(Taguchi method)<sup>3,4</sup>을 이용하였다. 다구찌 방법의 두 가지 중요한 수단은 반응을 평가하는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SN비)와 직교배열표(orthogonal array)이다.

Rao<sup>5</sup>는 직교배열표를 실험계획에 적용하도록 처음 제안하였다. Yokoyama<sup>6</sup>와 Phadke 이래로 다구찌 개념에 기초한 많은 설계방법들이 개발되었다.<sup>3,7-10</sup> 이 영역에서의 문헌의 중요한 부분은 설계변수의 수준간격을 가능한 크게 하고 효과가 큰 설계변수들만 집중 개선하는 방법이다.

본 연구의 선철 제조공정 실험은 대단히 고가이고 직교배열표가 제시하는 최소한의 실험마저도 얻지 못하는 결측값(missing value)이 발생한 경우가 있다. 따라서 직교배열표 실험에 현장의 관찰 자료(observational data)<sup>11,12</sup>를 혼합하여 효과가 큰 공정변수의 민감도 결정 방법을 제안한다. 제안된 방법의 실험결과로부터 다음과 같은 특성을 고찰하였다.

- (i) 밀스케일 성형재의 허용강도에 적합한 결합제(binder) 및 배합비율
- (ii) 금속화율 95 % 이상을 만족하는 공정변수의 최적 조건 결정




## 2. 밀스케일 전처리 과정

밀스케일을 이용한 선철 회수 방법은 밀스케일과 환원제를 혼합해서 럼프(lump) 상태로 성형하여 생산하는 직접환원법이 있다. 환원철은 Fe 순도 95 % 이상의 직접환원철을 생산한다. 이하의 절에 그 과정을 설명한다.

### 2.1 밀스케일 혼합

철을 고온으로 가열하면 공기 중의 산소가 철 표면에서 철원자와 결합해서 산화철을 만드는데 이를 밀스케일이라고 한다. 일반적으로 밀스케일은 제강 연주 공정(continuous casting), 압연(rolling) 가열로 및 디스케일러(descaler) 공정, 단조 공정에서

Table 1 Chemical compositions of mill scale

Component	Continuous casting	Rolling	Desclaer
T-Fe	73.77 %	73.18 %	72.65 %
M-Fe	0.20 %	0.10 %	0.35 %
FeO	64.16 %	63.82 %	59.49 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.19 %	33.56 %	37.25 %
Sample			

발생한다.

Table 1은 밀스케일이 발생하는 공정에 따른 화학적 조성을 분석한 것이다. 조성비는 큰 차이가 없다. 밀스케일의 입도는 성형방법을 결정하는 중요한 척도가 되는데 1 mm이하 42.7 %, 1 mm~3 mm에서 36.6 %, 3 mm이상 20.7 %이다.

밀스케일의 환원제는 탄소(carbon)와 수소가스가 있다. 본 연구에서는 탄소로 분류되는 석탄(coal)과 코크스(cokes)중에 비용면에서 상대적으로 환원율이 좋은 금속 코크스(metallurgical cokes)를 이용하였다. 또한 혼합물의 점결성이 유지 되지 않으면 운반 및 장입 시 비산 또는 재분진화가 초래되므로 성형물의 강도는 중요하다. 결합제는 성형물의 강도를 향상시키는데 매우 중요한 역할을 한다. 결합 형태에 따라 모재(matrix), 필름(film), 화학(chemical) 결합제가 있는데 본 연구에서는 모재 결합제로 당밀(molasses)과 필름 결합제로 벤토나이트(bentonite)를 선정하였다.

### 2.2 성형 방법

일반적인 밀스케일의 성형방법은 입도분포의 크기에 따라 페레타이징(pelletizing)과 단광법(briquetting)이 있다. 입도의 크기는 기계적 강도에 영향을 미치는 입자간의 접촉면적과 관련된다.

연구대상의 밀스케일 입도는 1 mm 이상이 약 30 % 이상이므로, 조대한 입자로 구성된 물질의 성형에 적합한 단광법을 이용하였다. 생산성 및 환원에 필요한 혼합물의 비용을 고려해서 성형재는 직육면체 형상의 20 mm×30 mm×30 mm 크기로 결정하였다.

시험편 제작과정은 원료계측, 혼합, 방진, 몰드 성형, 건조 과정 후에 소형건기로(muffle box furnace)를 이용하여 소결하였다. 소결온도는 각각

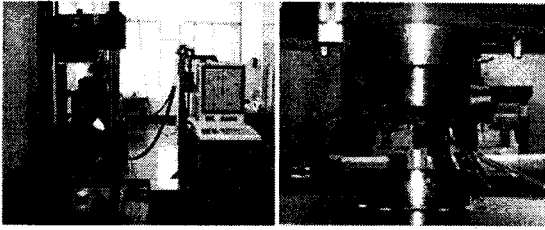


Fig. 1 Universal testing machine

Table 2 Testing case for binder mixing ratio

No.	Bentonite	Molasses	Binder ratio	Mill scale	Cokes
1	4.0 g	0 g	1.5 %	220 g	46 g
2	8.0 g	0 g	3.0 %	220 g	46 g
3	13.3 g	0 g	5.0 %	220 g	46 g
4	0 g	4.0 g	1.5 %	220 g	46 g
5	0 g	8.0 g	3.0 %	220 g	46 g
6	0 g	13.3 g	5.0 %	220 g	46 g
7	2.7 g	5.3 g	3.0 %	220 g	46 g
8	5.3 g	2.7 g	3.0 %	220 g	46 g
9	4.0 g	4.0 g	3.0 %	220 g	46 g
10	4.0 g	9.3 g	5.0 %	220 g	46 g
11	9.3 g	4.0 g	5.0 %	220 g	46 g
12	6.7 g	6.7 g	5.0 %	220 g	46 g

150℃, 500℃, 800℃ 경우에 대해 가열 후 30분간 유지하고 공냉하여 완성하였다.

### 2.3 성형재 강도시험

밀스케일 혼합과정 중 가장 중요한 점은 결합제 비율에 대한 강도를 평가하는 것이다.

Fig. 1은 소결한 시험편에 대하여 성형물의 강도 시험을 위한 만능재료시험기 (Shimadzu, UH-100A)를 나타낸 것이다. Table 2는 결합제 배합비율에 작용하는 강도를 평가하기 위한 12 회의 실험 조건을 나타낸 것이다. 전체 시험편은 동일하게 밀스케일과 코크스 합계 중량 266 g, 물 21 g을 첨가하였다.

Fig. 2는 결합제의 배합비율에 대한 성형재의 압축강도를 나타낸 것이다. 벤토나이트와 당밀 모두 배합비율에 비례하여 압축강도가 증가하였다.

성형재가 요구되는 최소압축강도 0.7 kg/mm<sup>2</sup>를 만족하려면 벤토나이트는 3%, 당밀은 5%, 벤토나이트와 당밀 혼합비율은 5% 이상 첨가되어야 한다. 본 실험의 경우 최대압축강도는 벤토나이트 3.5%와 당밀 1.5%의 배합비율이다.

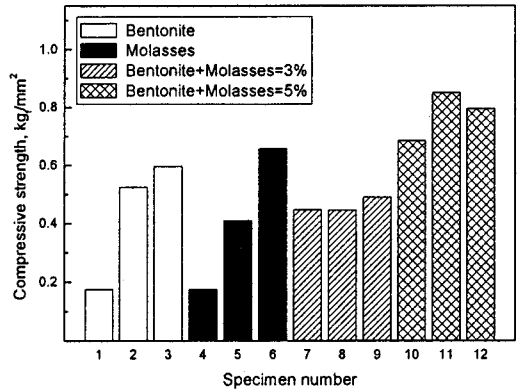


Fig. 2 Compressive strength of cold forming specimens for binder mixing ratio

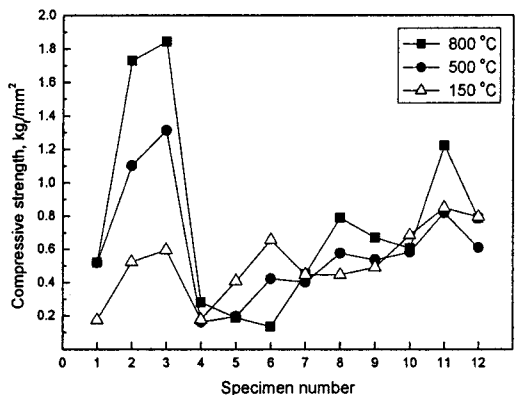


Fig. 3 Relationship between compressive strength and sintering temperature

Fig. 3은 Table 2의 실험 경우에 대해 소결온도와 성형재의 압축강도 관계를 나타낸 것이다. 벤토나이트만 사용할 경우 소결온도가 높을수록 강도가 큰 폭으로 증가하였고, 당밀만 사용할 경우 반대로 소결온도가 낮을수록 강도가 증가하는 경향을 보인다. 이러한 이유는 당밀은 벤토나이트에 비해 약 50℃ 이상부터 연소되는 특성을 가지고 있으므로 강도가 상온의 건조 상태보다 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

## 3. 환원시험의 결과 및 요약

### 3.1 다구찌 방법의 적용

밀스케일을 이용한 전처리 공정에서 선철 회수

Table 3 Process parameters and their levels

Process parameter	Description	Level 1	Level 2	Level 3
X1	C content	20 %	25 %	30 %
X2	Thickness	10 mm	15 mm	20 mm
X3	Granularity	1 mm	2 mm	3mm
X4	Heat treatment temperature	1100℃	1200℃	1300℃

Table 4 Results of L18 array with observational data

No.	Compressive strength <sub>2</sub> (kgf/mm <sup>2</sup> )	Total Fe (%)	Metallization (%)
1	12.9	92.6	80.25
2	12.5	92.79	92.01
3	14.6	92.5	91.13
4	10.3	84.82	87.21
5	11.7	90.03	84.25
6	8.6	74.94	61.67
7	15.3	91.35	95.47
8	15.2	91.85	96.11
9	15.4	91.77	96.85
10	14.5	92.30	95.13
11	14.7	92.01	95.52
12	12.4	88.75	85.8
13	13.7	86.27	88.52
14	12.0	87.02	88.34
15	10.4	81.30	64.85
16	12.6	88.87	92.14
17	10.3	78.2	93.02
18	10.9	73.35	88.27

에 영향을 미치는 공정변수의 민감도 해석과 최적 조건을 얻기 위해 다구찌 방법을 이용하였다.

다구찌 방법은 제어할 수 있는 영향력이 큰 설계변수를 직교배열표를 이용하여 자료를 얻고 이 결과로부터 SN비(signal-to-noise ratio)를 분석함으로써 최적값을 결정하는 것이다. SN비는 목적함수의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도로서 분산 예측값에 대한 모평균 제곱의 예측값의 비로 나타난다. 다구찌 방법의 모든 단계는 산포를 줄이는 방향이다.<sup>3</sup> 산포를 줄이는 것은 SN비를 높이는 것과 같다. SN비는 문제에 따라 망목(nominal the best), 망소(smaller the better), 망대(larger the better) 특성으로 정의된다. 본 연구의 밀스케일의 금속화율과

압축강도는 크면 클수록 좋은 망대 특성이므로 이때 SN비는 다음의 식 (1)과 같다.

$$SN_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 반복회수,  $y_i$ 는 반응값을 나타낸다. 일반적인 민감도 해석은 SN비에 대한 분산분석(analysis of variance)을 이용해서 SN비에 유의한 영향을 주는 설계변수 수준을 평가한다. 최적 수준은 다시 확인 실험을 통해 최적이라고 추정된 값과 비교하여 재현성을 평가하고 시험조건을 표준화한다.

밀스케일 환원특성에 대한 예비실험은 표준직교배열표 L27에 8개 공정변수(고정탄소량, 입도, 결합제 종류, 성형두께, 성형조건, 건조온도, 환원시간, 열처리 온도)를 고려하였다.

이 실험은 대단히 고가이고 많은 시간이 소요되어 예정대로 실험 자료를 얻지 못하는 결측값(missing value)이 존재한다. Table 3은 재수정된 4개의 공정변수(X1=고정탄소량, X2=성형두께, X3=입도, X4=열처리 온도)와 3 수준 범위를 나타낸다. Table 4는 결측값이 포함된 L18의 실험결과이다. 이 조건에서 실제 예정대로 실험자료를 얻지 못하는 결측값이 No. 17에서 나타났다.

본 논문에서 결측값이 존재하는 경우는 실험에 상당한 산포가 있는 경우가 많다.<sup>3</sup> 금속화율에 대한 효과가 큰 공정변수 선택을 목적으로 한다면 결측값 추정은 Fisher-Yates 방법이 있지만 본 논문은 범용성이 높은 축차근사법(successive approximation)을 이용한다.<sup>11,13</sup> 축차근사법의 순서는 다음과 같다.

[단계 1] 결측 근방에 응답 평균값을 대입하여 이를 제 0차 근사값으로 한다.

[단계 2] 결측 이외의 큰 효과의 요인을 사용하여 근사모형을 작성한다. 이 근사모델로 결측값을 추정하고 이를 제 1차 근사값으로 한다. 근사모델은 변수  $x$ 가 등간격일 때 각 변수의 차수 항이 분해 가능한 식 (2)의 형태인 Chebyshev 직교다항식(orthogonal polynomial)<sup>14,17</sup>을 이용하였다.

$$y = b_0 + b_1(x - \bar{x}) + b_2 \left[ (x - \bar{x})^2 - \frac{k^2 - 1}{12} h^2 \right] + b_3 \left[ (x - \bar{x})^3 - \frac{3a^2 - 7}{20} (x - \bar{x}) h^2 \right] \dots \quad (2)$$

여기서  $b_0$ 는 응답  $y$ 의 평균값,  $k$ 는 수준수,  $h$ 는

Table 5 Analysis of variance for metallization

Parameter	Dimension	DOF	Variance	F-ratio	Effective ratio(%)
X1	1	1	192.73	26.75	12.1
	2	1	63.85	8.86	4
X2	1	1	46.17	6.41	2.9
	2	1	12.27	1.70	0.8
X3	1	1	72.70	10.09	4.6
	2	1	43.25	6.00	2.7
X4	1	1	936.40	129.94	59.1
	2	1	218.16	30.27	13.8
Error		7	64.86		
Total		17	1650.38		100

수준간의 간격이다. 분산분석에서 유의한 차수의 항을 선택하고  $b_1, b_2, b_3$ 는 직교다항식 계수(orthogonal polynomial coefficient)에 의해 계산하여 근사모델을 작성한다. Chebyshev 직교다항식은 각 항이 서로 독립적이기 때문에 계수의 추정을 저차항에서 고차항으로 축차적으로 구한다. 이것은 고차항의 계수를 모르거나 계수차이가 크게 되더라도 기저(base)를 정규화(normalize)할 수 있어 효율적인 근사모델의 표현이 가능하다.<sup>15,17</sup>

[단계 3] 결측 추정값이 수렴하기까지 단계 2를 반복한다.

금속화율에 대한 17개 자료의 평균은 87.34 %이다. Table 5는 이 값을 대입해서 1차 및 2차항으로 분해한 분산분석 결과를 나타내고 이를 근사모델로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$y = -1683.1 + 97.91x_1 - 18.517x_1^2 - 4.514x_2 + 0.13927x_2^2 + 2.691x_3 - 1.0071x_3^2 + 2.6519x_4 - 0.001044x_4^2 \quad (3)$$

Table 4의 No. 17의 실험조건은 X1(3 수준), X2(1 수준), X3(2 수준), X4(3 수준)을 식 (3)에 대입하면 97.23 % 얻는다. 따라서 결측값의 1차 근사값은 97.23 %이다. 같은 방법으로 이 값을 이용하여 분산분석을 수행해서 식 (4)의 근사모델을 얻는다.

$$y = -1586.1 + 95.85x_1 - 17.692x_1^2 - 2.453x_2 + 0.07333x_2^2 + 3.103x_3 - 1.1101x_3^2 + 2.4582x_4 - 0.000962x_4^2 \quad (4)$$

식 (4)를 이용한 No. 17에서 제 2차 근사값은

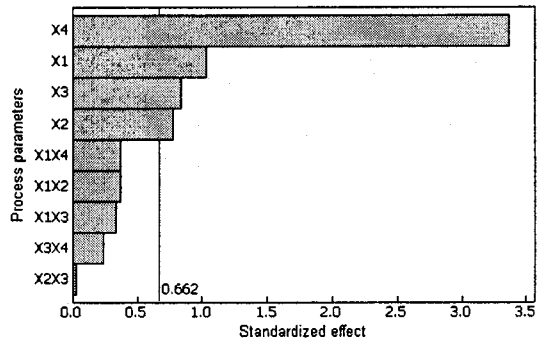


Fig. 4 Pareto chart of the standardized effects for metallization

96.67 %를 얻는다. 이 과정을 5회 반복 후에 근사값으로 93.06 %가 얻어졌다. 이는 제 4차 근사값인 93.02 %와 크게 다르지 않고 수렴하므로 여기서 중단하였다. 따라서 No. 17의 대응값을 93.02 %로 결정하였다.

Fig. 4는 금속화율에 대한 공정변수의 민감도를 파레토 차트(Pareto chart)를 이용해서 나타낸 것이다. 이 차트에서 효과의 절대값은 Lenth's 방법<sup>18,19</sup>을 이용하여 참조선으로 표시된다. 참조선을 지나 뿐 있는 효과는 잠재적으로 중요하다는 의미이다.

파레토 차트 결과는 다음의 두가지 정보를 얻을 수 있다. 첫째, 금속화율에 영향을 주는 지배적 공정변수는 열처리 조건이고 교호작용의 영향은 작다는 것이다. 일반적으로 밀스케일의 혼합공정에서 성형제의 강도와 환원특성은 입도와 고정탄소량을 조절하는 방법을 사용한다. 입도가 작을수록 충전층 기공율이 크고 비표면적이 증가하기 때문에 환원반응 속도도 빠른 경향을 보인다. 하지만 Fig. 4의 결과는 열처리 온도를 조절하는 것이 강도를 최대로 하는데 효과적임을 나타낸다.

Fig. 5~Fig. 7은 Fig. 4에서 평가된 4가지의 주요 공정변수에 대한 SN비 주효과(main effect)를 표시한 것이다. SN비에 대한 주효과는 분산분석과 비교해서 정확한 인과관계를 구하기 위한 것이 아니라 반응값의 입력효과와 나머지 효과로 분해하여 두 효과의 비를 설계평가에 이용하기 위한 것이다.

결측값이 있을 경우 SN비에 대한 주효과는 공정변수의 설계 방향을 결정하는데 효과적인 정보를 얻을 수 있다. 전체적으로 공정변수 민감도 크기와 수준은 고정탄소량(X1), 열처리 온도(X4)는 3수준으로 증가할수록, 성형두께(X2), 입도(X3)는 1수준

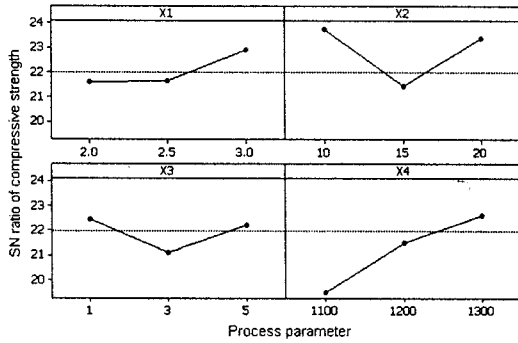


Fig. 5 Main effects plot for compressive strength

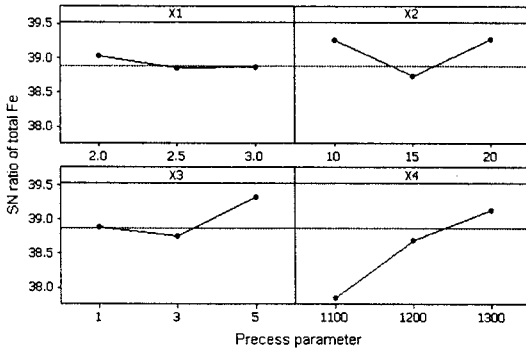


Fig. 6 Main effects plot for total Fe

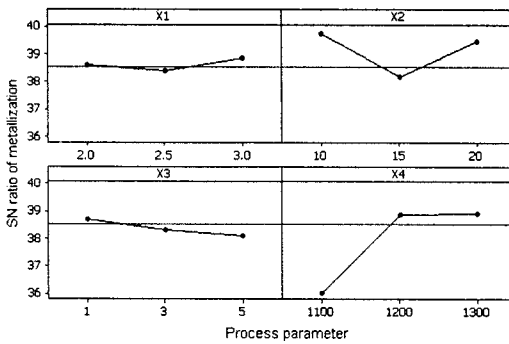


Fig. 7 Main effects plot for metallization

으로 감소할수록 각 반응값의 특성이 좋아진다. 따라서 압축강도를 높게 하면 최종적으로 선철을 회수하는 금속화율이 높아짐을 알 수 있다.

Table 6은 SN비를 이용한 금속화율에 대한 공정변수의 수준별 효과를 계산한 것이다. 여기서 수준차(deviation)는 공정변수의 수준별 효과의 최대값과 최소값 차이이고 기여율은 전 수준차의 합에

Table 6 Process parameters affecting the metallization

Process parameter	Effect			Deviation	Percentage contribution (%)	Rank
	Level 1	Level 2	Level 3			
X1	38.59	38.39	38.85	0.46	8.3	4
X2	39.72	38.18	39.45	1.54	27.8	2
X3	38.71	38.32	38.09	0.62	11.2	3
X4	36.02	38.89	38.94	2.92	52.7	1
Total				5.54	100	

대한 백분율(percentage contribution)로 나타낸 것이다.<sup>20</sup> 밀스케일 원료의 전처리 공정에서부터 환원반응후의 선철을 얻기까지 금속화율에 가장 영향을 많이 미치는 공정변수는 열처리 온도와 성형두께라는 것을 알 수 있다. 이때 금속화율의 평균 SN비는 38.538, 반응값은 85.62 %이다. 공정변수의 최적조건은 고정탄소량이 30 %(3 수준), 성형두께 10 mm(1 수준), 입도 1 mm(1 수준), 열처리 온도 130 0℃(3 수준)이다.

### 3.2 재현성 평가

재현성 평가는 선택된 공정변수로부터 기대되는 반응값을 예측한다.

SN비에 가장 좋은 효과를 주는 공정변수를 선택하고 다른 공정변수의 몇몇 조합으로부터 SN비와 평균 반응을 예측한다. 그러므로 결측값 처리가 분석결과에 얼마나 영향을 미치는지 평가할 수 있다. 다음으로 선택된 수준으로 실험을 수행하여 예측된 결과와 일치되는지 확인한다. 만약 예측한 반응값과 실험값 사이에 불일치하면 결측값 및 교호작용, 순수 실험의 오차가 있다고 가정할 수 있다. SN비 예측값을  $\mu$ 로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\mu = \bar{T} + (X_i^{Level} - \bar{T}) \quad (5)$$

여기서  $\bar{T}$ 는 전체 평균,  $X_i^{Level} - \bar{T}$ 는 각 변수의 최적수준에서 좋아지는 효과를 의미한다.

예측의 기본개념은 효과를 더해 나가는 것이다. 이를 변수 효과의 가법성(additivity)<sup>3,4</sup>이라고 한다. SN비는 단위 변화량 산포의 역수이다. 즉, 제곱의 형태로 나타내는 의미는 가법성 때문이다.

Table 7은 Table 6에서 얻은 금속화율의 SN비

Table 7 Comparison between prediction and optimal results

Result	Optimal value	Predicted value	Error (%)
SN ratio	38.538	39.722	3.07
Mean	85.62	96.85	13.12

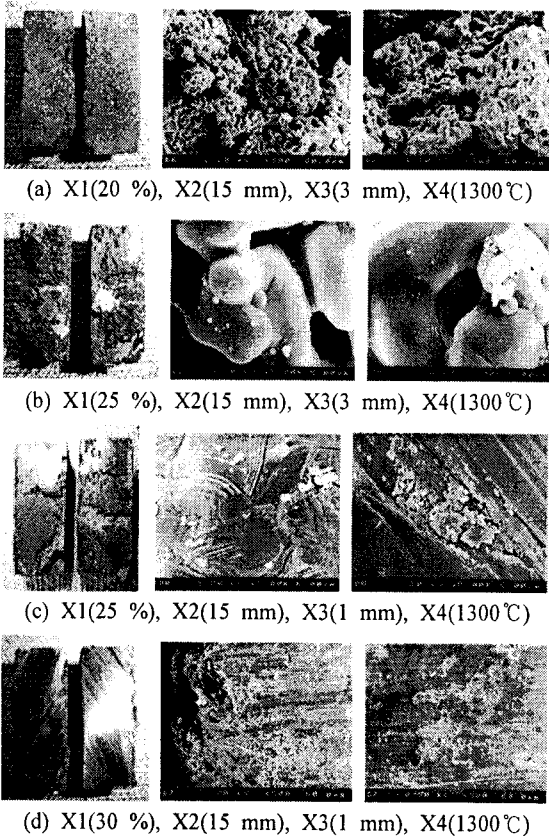


Fig. 8 SEM photographs of direct reduced iron process using orthogonal array

결과를 이용하여 최적조건에서의 값과 예측된 값을 비교한 것이다. 비교적 일치하므로 재현성이 있다고 판단된다. 얻은 조건으로 확인실험을 수행하여 실제 실험결과와 분석한다.

### 3.3 환원특성 분석

Fig. 8은 직교배열표를 이용한 대표적인 환원조건 실험에 대해 주사전자현미경(scanning electronic

microscopy)을 이용하여 단면을 관찰한 사진이다.

대부분 밀스케일의 환원반응은 어렵게 나타나는 단결정 생성이 여러 부분에서 발생되고 부분적으로 밝은 부분의 치밀한 철층이 생성되는 경향을 보인다. 단결정 생성은 낮은 환원온도에서 형성되고, 철층은 1200°C 이상 높은 온도에서 생성되었다. 밀스케일의 충전층 환원은 마립일수록 충전층의 기공율이 크고 비표면적이 증가하기 때문에 반응속도가 빠른 경향을 보였다.

최적조건에서 다시 확인실험을 한 경우인 Fig. 8(d)는 밀스케일 입도가 1 mm, 환원제는 금속코크스로 그 사용량은 밀스케일 혼합 양에 약 30 %인 경우이다. 환원온도는 1300°C일 때 환원성과 압축강도가 가장 우수하였다. 그러나 실험결과에서 얻은 직접환원철의 화학성분을 분석한 결과 금속화율은 92 %이다. 이것은 재현성 평가 결과 예측된 96.85 %와 비교하면 오차는 5.3 %로 유의하지만 여전히 소량의 미환원 산화철이 함유되어 있음을 알 수 있다. 사진에서 철분입자가 어렵게 나타난 부분이 미환원된 부분이다. 따라서 환원반응 속도에 관계된 추가적인 공정변수의 고려하고 환원철 성분의 금속조직 특성을 평가할 필요가 있다.

## 4. 결론

본 논문은 밀스케일을 럼프 상태로 성형하여 효율적으로 선철을 회수하는 직접환원철 공정과 이에 공정변수 민감도 해석을 다구찌 방법들을 이용하여 적용하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 효과적인 선철의 회수하기 위해 직접환원철 공정의 개발은 두 단계로 요약된다. 1단계: 밀스케일 혼합공정에서 공정변수에 따른 성형체의 강도분석, 2단계: 금속화율을 최대화하는 공정변수의 최적조건 결정 과정이다.

(2) 공정의 각 과정의 실험은 고가의 비용이고 많은 시간이 소요된다. 본 논문의 실험 결과는, 직교배열표의 실험계획에 따라 예정대로 실험자료를 얻지 못하는 결측값이 존재한다. 이 경우는 정확한 통계량 추정이 가능하지 않다. 따라서 결측값 처리는 축차근사법과 반응값의 입력효과와 나머지 효과로 분해하여 두 효과의 비를 설계에 평가하는 SN 비를 이용하여 공정변수의 민감도를 해석하고 최적수준을 결정하였다. 최적수준의 재현성은 오차 5.3 % 이내로 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업의 지원(과제번호:10024327)으로 연구되었음.

## 참고문헌

1. Teng, S. C., Chien, Y. T. and Ko, Y. C., "Effect of Forms of  $B_2O_3$ - $SiO_2$  as An Additive on Magnetic Properties of  $SrFe_{12}O_{19}$  Ferrites," J. Materials Science, Vol. 27, No. 10, pp. 2665-2669, 1992.
2. Yoon, J. K. and Shin, J. D., "Introduction to Ferrous Metallurgy," Daewoong Publishing, pp. 611-619, 2004.
3. Phadke, M. S., "Quality Engineering Using Robust Design," Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.
4. Peace, G. S., "Taguchi Methods," Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
5. Rao, C. R., "Factorial Experiments Derivable from Combinatorial Arrangements of Arrays," Journal of Royal Statistical Society, Series B, Vol. 9, No. 1, pp. 128-139, 1954.
6. Yokoyama, Y. and Taguchi, G., "Business Data Analysis: Experimental Regression Analysis," Maruzen, 1975.
7. Sundaresan, S., Ishii, K. and Houser, D. R., "Procedure using Manufacturing Variance to Design Gears with Minimum Transmission Error," ASME J. Mech. Des., Vol. 113, No. 3, pp. 318-324, 1991.
8. Otto, K. N. and Antonsson, E. K. "Extensions to the Taguchi Method of Product Design," ASME J. Mech. Des., Vol. 115, No. 1, pp. 5-13, 1993.
9. Ku, K. J., Rao, S. S. and Chen, L., "Taguchi-Aided Search Method for Design Optimization of Engineering Systems," Engineering Optimization, Vol. 30, No. 1, pp. 1-24, 1998.
10. Park, G. J., "A Design Methodology with Orthogonal Arrays Using Experiments and Computer Simulations," Trans. of the KSME (A), Vol. 28, No. 7, pp. 885-895, 2004.
11. Ramsey, F. L. and Schafer, D. W., "The Statistical Sleuth: A Course in Methods of Data Analysis, Second Edition," Duxbury Press, pp. 10-234, 2001.
12. Godolphin, J. D., "Reducing the Impact of Missing Values in Factorial Experiments Arranged in Blocks," Quality and Reliability Engineering International, Vol. 22, No. 6, pp. 669-682, 2006.
13. Ceylan, Z. and Trabia, M., "Optimization of the Closure-Weld Region of Cylindrical Containers for Long-Term Corrosion Resistance Using the Successive Heuristic Quadratic Approximation Technique," ASME J. Mech. Des., Vol. 125, No. 3, pp. 533-539, 2003.
14. Gautschi, W., "Orthogonal Polynomials: Application and Computations, Acta Numerica," Oxford University Press, pp. 45-119, 1996.
15. Kashiwamura, T., Shiratori, M., Yu, Q. and Kohda, I., "Structural Optimization Using the Design of Experiments and Mathematical Programming," Trans. of the JSME (A), Vol. 62, No. 601, pp. 2180-2185, 1996.
16. Baek, S. H., Hong, S. H., Cho, S. S. and Joo, W. S., "Multi-objective Optimization in Discrete Design Space using RSM-Based Approximation Method," The Third China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM3), pp. 125-130, 2004.
17. Baek, S. H., Cho, S. S., Kim, H. S. and Joo, W. S., "Trade-off Analysis in Multi-objective Optimization Using Chebyshev Orthogonal Polynomials," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 366-375, 2006.
18. Lenth, R. V., "Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials," Technometrics, Vol. 31, pp. 469-473, 1989.
19. Minitab, "MINITAB User's Guide #2: Data Analysis and Quality Tools," Minitab Inc., 2000.
20. Baek, N. K. and Kim, D. E., "Optimization of Laser Lithography Micropatterning Technique Based on Taguchi Method," J. KSPE, Vol. 19, No. 7, pp. 59-63, 2002.