

다구치 방법을 활용한 해머밀 분쇄공정의 최적화 연구

Taguchi's Robust Design Method for Optimization of Grinding Condition by Hammer Mill

최 흥 일(Hong-Il Choe)¹ · 김 병 곤(Byoung-Gon Kim)^{2,*} · 박 종 력(Chong-Lyuck Park)² · 정 수 북(Soo-Bok Jeong)² · 전 호 석(Ho-Seok Jeon)² · 장 희 동(Hee-Dong Jang)²

¹과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과
(Department of Resource Recycling, University of Science & Technology (UST), 113 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-333, Korea)

²한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원처리연구실
(Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 저등급 석탄인 갈탄(lignite)을 순환 유동층 가스화기(circulating fluidized bed gasifier)의 효과적인 가스화를 위한 공급탄으로 제조하기 위하여 모든 조건들은 동일하고 스크린의 크기만을 변경하여 목적하는 입도분포 특성을 달성하는 최적조건을 찾기 위한 실험을 수행하였다. 가스화기 공급탄은 0.045~1 mm 크기로 85 wt% 이상이 요구되며 이러한 입도분포를 갖는 공급탄을 제조하기 위해서는 경제적이면서도 효과적인 공정 설계가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구는 중국산 갈탄을 해머밀로 효과적으로 분쇄하기 위하여 다구치 설계를 사용하였으며, 설계조건에 따른 실험결과 및 통계분석 결과 95% 유의수준에서 1차 스크린의 크기는 3 mm, 2차 스크린의 크기는 1.3 mm인 경우가 최적화된 조건인 것으로 나타났다.

주요어 : 해머밀, 다구치 설계, 저등급석탄, 가스화, 분쇄

ABSTRACT : Optimal grinding condition was examined by changing only the size of screen opening with fixing other factors to produce coal fines of particle sizes required for circulating fluidized bed gasifier. At least 85 wt% of the coal particles should fall into the size range of 0.045~1.0 mm for efficient gasification. In this study, hammer mill was used to grind Chinese low rank lignite coal following grinding condition designed by Taguchi method. The analysis of signal to noise ratio showed that optimum grinding condition for the gasifier was 3 mm in primary screen size and 1.3 mm in secondary screen size on the 95% level of significance.

Key words : Hammer mill, Taguchi design, low rank coal, gasification, grinding

서 론

석탄은 전통적인 화석 에너지 자원으로 전 세계

전력 생산의 단일 원료로는 가장 많이 쓰이는 원료이며, 최근에는 직접 연소 방법만이 아니라 가스화 또는 액화기술의 발전으로 전력 생산 뿐만 아니라 산업적 이용이 증대되고 있다(World Coal Institute,

*교신저자: bgkim@kigam.re.kr

2009). 다른 에너지 자원과는 달리 널리 분포하고 있는 석탄은 2010년 현재 석탄을 생산하고 있는 나라는 약 50개국이나, 그 생산량의 절반 이상을 10개국에서 모두 소비하고 있다. 특히 최근 중국의 고도의 산업발전으로 전 세계의 석탄소비가 2002년과 2007년 사이에 약 35%까지 증가하였고, 앞으로도 세계의 석탄소비는 지속적으로 성장할 것으로 예상되고 있다(International Energy Agency, 2010). 이렇게 지속적인 석탄 소비의 상승으로 전처리 없이 사용할 수 있는 고등급의 석탄자원은 국가적으로도 확보하기 어려워지고 있는 실정이며, 따라서 수분 및 불순물의 함유가 높아 사용하기 어려운 저등급의 석탄(low-rank coal)의 활용을 위한 전처리 연구가 활발히 이루어지고 있다(이시훈과 김상도, 2008; 박종덕 외, 2010).

본 연구에서는 석탄의 효율적 가스화를 위하여 가스화기에 적합한 조건의 석탄을 제조하고자 하였다. 현재 석탄을 원료로 하는 가스화기로는 고정층, 유동층, 분류층 등의 가스화기가 있으나 대부분은 저 등급 석탄에 특화되어 개발되지 않았다. 그 예로 Shell사의 분류층 석탄 가스화기는 모든 등급의 석탄을 사용할 수 있다고 하지만 공급되는 탄의 크기가 0.075 mm 이하, 수분함량 5 wt% 이하, 회분함량 25 wt% 이하의 조건을 만족하여야 하기 때문에 현실적으로 모든 종류의 저등급 석탄을 사용하기에는 어려움이 많다. 하지만 KBR사의 순환유동층가스화기(circulating fluidized bed gasifier)는 공급탄의 수분함량, 회분함량 등에 대하여 특정한 규격을 요구하지 않으며, 단지 석탄 입자들의 크기가 0.045 mm 이상 1 mm 이하의 범위만 만족하면 효과적으로 석탄 가스화 공정 운영이 가능한 것으로 알려져 있다.

일반적으로 어떤 특정화된 공정의 다양한 운전 변수들을 최적화하기 위해서는 실험설계에 의한 통계적 처리방법을 많이 사용하고 있다. 다구치법(Taguchi method)은 강건설계(robust design)기법으로 알려진 실험설계법 중의 한 가지 방법으로, 1950년대 초에 다구찌 겐이찌 박사가 제시한 제품 및 공정설계 최적화를 위한 통계적 데이터 처리 방법이다. 특히, 다구치법은 생산되는 제품의 손실을 최소화하고 품질을 일정 수준이상으로 유지하기 위하여 주로 사용되며, 손실함수와 신호대 잡음비(signal to noise)를 이용함으로써 품질에 부정적 영향을 주는 변수들의 영향을 둔감하게 하여 최적의 생산 조건을 도출할 수 있다는 장점이 있다(김기도

Table 1. Composition of raw coal sample (wt%)

Basis	Fixed carbon (%)	Moisture (%)	Volatile (%)	Ash (%)
Wet basis	18.20	28.09	41.80	11.85
Dry basis	25.39	-	58.13	16.48

와 김희택, 2007).

본 연구에서는 이러한 다구치법을 해머밀의 분쇄공정에 적용하여 순환유동층가스화기에 최적화된 입도분포(0.045~1.0 mm)를 갖는 석탄 분쇄조건을 알아보려고 하였다.

시료 및 실험방법

시료의 특성 분석

본 연구에서는 중국 내몽고 지역에서 생산된 갈탄(lignite)인 저등급 석탄을 시료로 사용하였다. 표 1은 원시료에 대한 공업분석을 열중량분석기(thermogravimetric analyzer, TGA601, Leco Co., Ltd., USA)를 사용하여 분석한 결과이다. 표 1의 공업분석결과 석탄 원시료의 수분함량은 28 wt%로 수분함량이 매우 높은 것으로 알 수 있다. 일반적인 석탄의 파·분쇄 공정에서는 10~30 cm 정도의 원탄을 죠크러셔(jaw crusher)나 로터리 브레이커(rotary breaker)를 사용하여 파쇄한 후 더 작은 크기로 분쇄하기 위하여 롤분쇄기(roll crusher)와 충격밀(impact mill)을 주로 사용하는 것으로 알려져 있다(Meyers *et al.*, 2001). 건식 파·분쇄 공정의 경우 시료의 수분함량이 분쇄능(grindability)에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 갈탄의 경우 다른 종류의 석탄과 다르게 수분의 함량이 매우 높아 수분함량이 증가할수록 분쇄능이 낮아지는 결과를 초래한다. 또한 본 연구에서 사용한 중국산 갈탄은 휘발분의 함량이 매우 높으며, 이는 분쇄공정에서 분쇄된 입자들 간의 응집을 유발시킬 수 있기 때문에 시료의 분쇄능을 저하시키는 요인으로 작용될 수 있다(Speight, 2005).

그림 1은 분쇄 실험에 사용된 해머밀(H-12, Hosokawa Micron Co., Ltd., Japan)의 개략도를 나타낸 것이며, H-12은 분쇄기 내로 투입된 입자가 회전하는 해머와 라이너(liner)에 충돌하여 분쇄가 이루어진다. 또한 본 연구에서 사용한 H-12 해머밀은 분쇄산물의 입도를 조절하기 위한 스크린의 교체

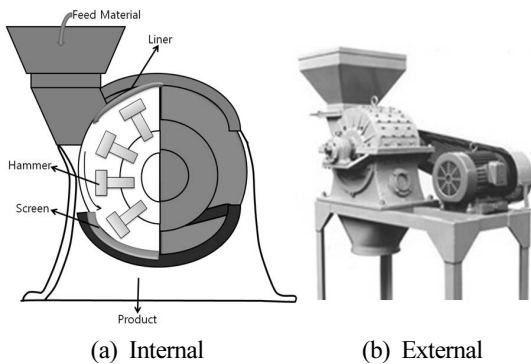


Fig. 1. Schematic diagram of H-12 swing hammer mill.

매우 용이하며, 다양한 크기를 갖는 스크린의 사용이 가능하여 분쇄산물의 최대입자 크기를 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

해머밀을 사용한 분쇄공정 설계

갈탄을 비롯한 여러 종류의 석탄을 사용 목적에 적합한 최적화된 분쇄 공정을 설계하는 연구는 각각의 석탄들이 갖는 특징 및 선정된 분쇄기의 특징에 따라서 많은 차이가 있다. 따라서 각 상황의 제한적인 환경적 요소를 고려한 상황별 조건을 확립하고 분쇄공정에 적용하여야 한다. 이번 분쇄 공정에서는 분쇄 산물이 목표입도범위에 비교적 넓게 분포하면서 과분쇄를 피하고자 폐쇄회로공정(closed circuit process)을 선택하였고, 공정의 단계는 그림 2와 같다. 1차 분쇄에서 1 mm 이하의 산물은 최종 분쇄산물 단계로 보내어지고 1 mm 이상의 입자들은 2차 분쇄를 통해 최종 분쇄산물이 된다. 이렇게 분쇄된 시료의 입도분석은 ASTM E 11-70에서 규정한 표준체로 입도분석을 실시하였다.

다구치법에 의한 실험조건 설계

일반적으로 해머 밀을 사용하는 석탄의 분쇄 공정에서 제어 가능한 공정 변수로는 생산량과 생산 입도와 관련이 깊은 로터의 회전속도(rpm), 급광율(kg/min), 투입시료의 입도(feed size, mm), 스크린 체눈의 크기(diameter, mm), 시료의 수분함량(wt%) 등이 있다. 특히 로터 회전속도의 경우, 해머밀에 의한 분쇄공정에서 분쇄산물의 입도에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 알려져 있으며, 1,000~3,000

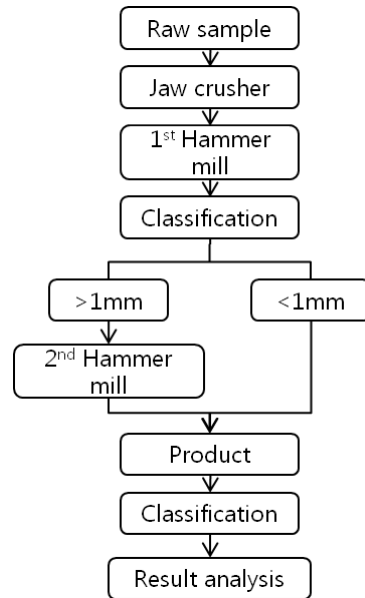


Fig. 2. Flowchart of grinding circuit.

rpm의 범위에서는 회전속도가 높을수록 1.0 mm 이하의 미분 발생량이 많아진다. 하지만 급광입도가 6.0 mm 이상인 경우에는 회전속도 변화에 따른 미분발생량의 차이가 거의 없는 것으로 보고되고 있다(Eswaraiah *et al.*, 2005). 또한 본 연구에서 사용한 H-12 해머밀의 경우 회전속도가 2,800 rpm으로 고정되어 있으며, 죠크러셔에 의하여 파쇄된 시료의 입도가 10 mm이기 때문에 로터의 회전속도는 실험변수로 사용하지 않았다. 그 외에 수분함량은 원시료의 수분함량인 28 wt%로, 투입시료의 입도는 조쇄한 시료의 입도로, 급광율은 시간당 500 kg으로 고정하여 실험조건을 설계하였다.

결과 및 고찰

분쇄 전 시료의 입도분석

초기 원시료의 직경은 100 mm 이상의 괴상으로 해머밀에 투입하기에는 너무 크기 때문에 죠크러셔를 이용하여 15 mm 이하로 파쇄하여 사용하였다. 그림 3은 죠크러셔에 의해 파쇄된 시료의 입도 분포를 나타낸 것이다. 그림 3의 결과에서 알 수 있듯이 파쇄 후에도 직경이 1.0 mm 이상인 입자가 전체 산물의 86.41 wt%를 차지하며, 10.0 mm 이상의 입자가 12.66 wt%를 차지하고 있어 순환유동층

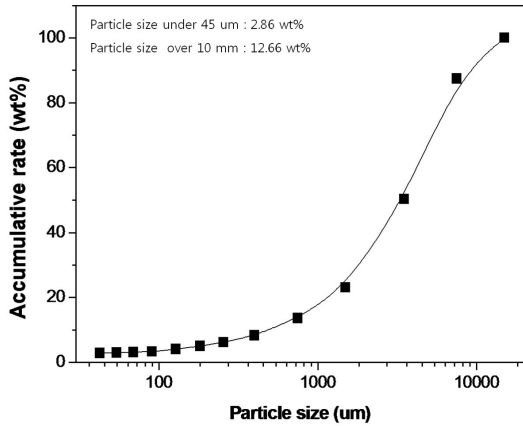


Fig. 3. Size distribution of lignite crushed by jaw crusher.

가스화기를 위한 입도분포 조건인 0.045~1.0 mm의 시료를 얻기 위해서는 추가적인 분쇄공정이 필요함을 알 수 있다.

본 연구에서는 해머밀에 의한 분쇄공정에서 분쇄산물의 입도에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 스크린의 크기일 것으로 판단하고, 이를 조절인자(control factor)로 선택하였다. 조절인자인 스크린의 크기는 1.3 mm에서 5 mm까지 변경이 가능하도록 설정하였다. 그림 4는 1차 해머밀의 스크린 크기를 변화가 목표 입도분포 범위의 생산량에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 스크린 크기 5.0 mm에서 분쇄시 본 연구에서 목표로 하고 있는 0.045~1.0 mm의 입도분포에 속하는 분쇄산물의 생산량은 42 wt% 정도인 것을 알 수 있다. 반면에 스크린 크기 1.3 mm에서 분쇄시 목표 입도분포에 속하는 분쇄산물의 생산량이 84 wt%로 목표 입도 분포 범위에 근접한 결과를 얻을 수 있으나, 단위 시간당 처리량이 241 kg/hr로 스크린 크기 5.0 mm일 때 1,138 kg/hr에 비하여 약 1/5로 감소하였다. 따라서 같은 양의 시료를 분쇄하고자 할 때 스크린 크기 5.0 mm이면, 스크린의 크기가 1.3 mm일 경우보다 에너지소비를 약 1/5만큼 절약이 가능하다. 그리고 목표 입도 분포 범위의 생성량을 비교해보아도 단위 시간에 스크린의 크기가 5.0 mm일 때 약 480 kg이며, 스크린의 크기 1.3 mm일 때는 약 202 kg으로 절반에도 미치지 못한다. 하지만 스크린 크기가 5.0 mm일 때 1.0 mm 이상의 입자 생성물이 스크린의 크기 1.3 mm에 비하여 약 96배 많이 생성되므로 재분쇄 공정이 반드시 필요하게 된다. 따라

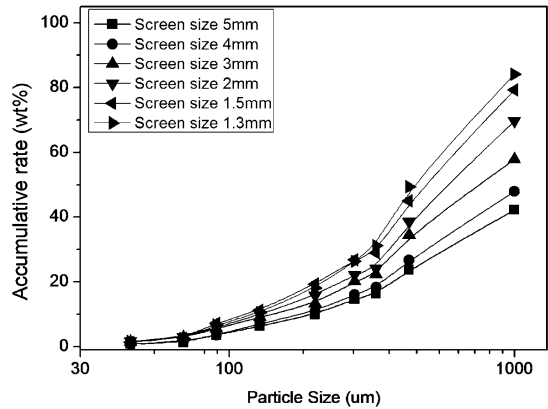


Fig. 4. Change of particle size distribution versus screen size of primary hammer mill.

Table 2. Process control factors and their levels

Control factors	Symbol	Level	Level	Level
		1	2	3
1 st screen size (mm)	A	5	4	3
2 nd screen size (mm)	B	2	1.5	1.3

서 그림 4의 결과로부터 1차 해머밀의 스크린 크기의 변경만으로는 시료를 적절한 입도분포로 분쇄하기가 어렵다고 판단되어, 해머밀의 의한 분쇄공정을 3.0~5.0 mm의 스크린을 이용하여 빠른 처리속도로 약 40~50 wt%의 목표 입도 분포를 가진 입자를 생성하는 1차 분쇄와 1.3~2.0 mm 스크린을 이용하여 1 mm 이상의 입자들만을 재분쇄하는 2차 분쇄로 나누어 분쇄하는 공정을 고려하였다. 다구치법에 의한 실험설계 조건으로 1차 분쇄용 스크린의 크기와 2차 분쇄용 스크린의 크기를 조절인자로 설정하였으며, 각 조절인자의 설정 수준은 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타낸 조절인자의 수준은 그림 4의 단일 스크린 분쇄 공정 산물에서 목적하는 입도인 0.045~1.0 mm 범위의 생산율을 비교하여 상대적으로 많은 생산율을 보이는 스크린 조건들을 2차 스크린의 변수들로 결정하였다. 결국 다구치법 설계를 위한 인자로는 조절인자가 2개, 각 인자별 수준이 3수준이므로 표준 직교표 중 $L_9(3^4)$ 을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단되었으며, $L_9(3^4)$ 를 이용하여 설계된 실험조건들은 표 3에 나타낸 바와 같다. $L_9(3^4)$ 직교표는 3개의 수준을 가지는 조절인자를 4개까지 선택가능하며, 9번의 실험을 수행한다.

Table 3. Experimental layout

Run	Levels of control factors	
	A	B
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

그리고 표 3의 조건으로 9번의 분쇄실험의 분쇄산물의 목표입도분포 범위인 0.045 mm (325 mesh) ~ 1 mm (18 mesh)의 분탄을 제외한 325 mesh 이하의 중량분율과 18 mesh 이상의 중량분율의 합을 실험의 결과 값으로 하여 그 결과 값이 15% 이하가 되는 조건이 이상적인 목표치이다. 실험의 결과 값들을 비교하기 위하여 다구치가 제안한 손실 함수에 근거하여 만들어진 S/N비(signal to noise ratio)를 특성치로 하여 인자들의 최적의 조건을 찾는다. S/N비는 신호대 잡음의 비로서 산출물의 품질에 긍정적인 영향을 주는 신호의 영향과 산출물의 품질에 부정적인 영향을 주는 잡음의 영향의 비율로 나타낸다. 이러한 S/N비는 특성치의 성질에 따라서 각각의 산출하는 수식이 다르므로 알맞은 수식을 선택해야 한다(Pignatiello, 1988). 산출된 S/N비를 효과적으로 분석하기 위하여 분산 분석 및 주효과 비교 분석 등을 통하여 이상적 분쇄 조건의 결과 예측을 통하여 확인 실험을 실시하고 그 결과를 분석하였다.

다구치법에 의한 신호대 잡음비 분석결과

이번 분쇄 실험에서의 목표는 가스화기에 최적화 된 입도(0.045~1 mm)를 제외한 이외의 입도를 갖는 분쇄산물 생산율이 목표치인 15% 이하로 생성되는 조건을 찾는 망소 특성(lower is better)을 확인하는 것이므로, 단일 스크린별 분쇄 결과를 바탕으로 실험 설계의 핵심인 조절 조건과 조절 조건의 수준을 결정하고 9번의 직교표에 의한 실험 결

Table 4. Experimental results of grinding process and S/N ratios

Run	Result	S/N
1	28.27	-29.0265
2	21.60	-26.6891
3	15.68	-23.9069
4	25.52	-28.1376
5	20.26	-26.1328
6	15.54	-23.8290
7	24.65	-27.8363
8	18.49	-25.3387
9	14.36	-23.1431

과를 바탕으로 S/N비를 수식 1 (김기도와 김희택, 2005; 조재립, 2007; Aslan, 2010)로 계산하여 표 4에 나타내었다.

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

망소 특성의 S/N비는 이상적인 목표치가 0인 경우를 의미하며, 수식 1에서의 n은 실험의 반복수를 의미하며, 이번 실험에서 n=1이다. 그리고 y는 i번째 실험 결과의 특성값을 의미하므로 이번 실험에서는 각각의 실험에서 얻어진 목표 입도 범위 이외의 생성율을 의미한다. 따라서 y값이 0에 가까울수록 분쇄 목적을 잘 이룬 것이며 S/N비의 값은 클수록 분쇄 목적을 잘 달성한 것이다. S/N비를 비교해보면 다른 실험들에 비하여 3번, 6번, 9번의 실험이 다른 실험에 비하여 S/N비가 크다. 따라서 실험의 조건들 확인해보면 두 번째 스크린의 크기가 모두 1.3 mm로 가장 작은 스크린 크기의 영향이라는 것을 정성적으로 추론 할 수 있다. 또한 S/N비에 대한 조절 인자들의 효과도를 그림 5에 작성해 보고 각 조건들 중에서 이번 분쇄 목적에 가장 효과적인 조건을 찾을 수 있었다. 그 조건들은 1차 스크린의 3번째 조건과 2차 스크린의 3번째 조건이며, 실험 계획법에서 말하는 최적의 조건이다. 따라서 상기의 조건으로 어떠한 변수들이 분쇄 효과에 더 많은 영향을 주는지 조사하기 위하여 S/N비에 대한 분산분석을 통하여 조사하였다.

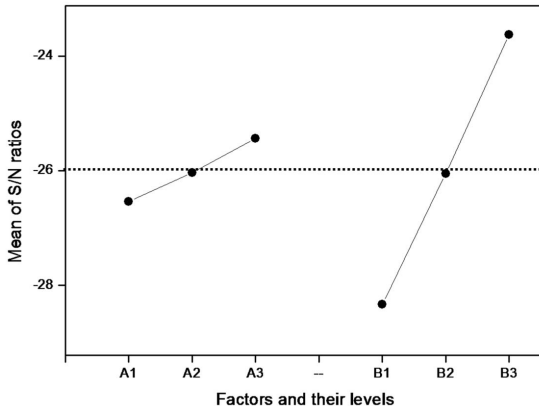


Fig. 5. Main effect graphs for S/N ratio.

S/N비에 대한 분산 분석 결과

분산분석은 회귀분석과 더불어 실험 통계학 분야에서 가장 널리 쓰이고 있는 분석 방법으로 관심 있는 반응 변수에 영향을 미치는 요인에 대한 실험 데이터의 분포를 총 변동으로 나타내고, 이러한 총 변동을 인자의 수준차이로 설명되는 변동(A)과 오차에 의한 변동(E)으로 분해하여 두 변동의 비가 통계적으로 유의한가를 검정하는 분석방법을 말한다(김기도와 김희택, 2005; 조재립, 2007). 그리고 분석표는 실험결과의 산포를 나타내는 총제곱 합 S_T (total sum of squares), 자유도(degree of freedom), 제곱 합을 자유도로 나눈 값인 평균제곱 합(mean square), 수준간의 S/N비를 활용한 기여율, 각 요인의 평균제곱 합과 오차의 평균제곱 합의 비인 F_0 값으로 만들어지며, F-수표에서 구한 값과 비교해 보고 F_0 이 크다면 요인과 오차의 관계가 유의한 관계라 할 수 있는 것이며, 이를 통계학에서 널리 쓰이는 유의수준 개념으로 P-value를 나타내기도 한다(김기도와 김희택, 2005). 그리고 P-value는 0에 가까울수록 효과가 큰 인자라 말할 수 있다.

Table 5. Analysis of variance (ANOVA) for S/N ratios

Symbol of control factors	Degree of freedom	Sum of squares	Mean of squares	Contribution	F_0	P-value
A	2	1.8235	0.9117	4.8604	16.8227	0.0113
B	2	33.2467	16.6233	93.9109	306.7198	0.0000
Error	4	0.2168	0.0542	1.2287		
Total	8	35.2869		100.0000		

Table 6. Confirmation tests results and comparison with predicted values

Run	Optimal control factor		Predicted value	Verification test
	A	B	S/N	S/N
10	3	3	-23.8673 ~ -22.2552	-23.4673

표 5는 이번 실험 결과를 분산분석표로 작성한 표이다. 이번 분석을 유의수준 0.05으로 하였을 때 1차 스크린의 크기 및 2차 스크린 크기 모두 P-value의 값이 유의수준 0.05보다 작으므로 모두 유의한 인자로 볼 수 있으며, 기여율(contribution)을 확인했을 때 1차 스크린 크기 변수들은 분쇄 실험 결과에 약 5% 이내의 기여율을 보이나, 2차 스크린의 변수들은 분쇄 실험 결과에 약 94%의 기여율을 보임을 확인할 수 있었다. 그리고 실험결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 산출된 S/N비를 활용하여 유의수준 0.05의 최적 조건의 S/N비 예측을 실시하였다. 확인 실험 결과는 표 6과 같이 S/N비는 -23.4673으로 예측 구간 -23.8673~-22.2552 사이에 포함되므로 본 실험 결과는 재현성이 있음을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 수분함유량이 높은 식물 분쇄에 가장 많이 활용되는 해머 밀을 이용하여 고수분의 갈탄을 1 mm 이하의 미분으로 제조하기 위하여 스크린의 크기를 변경해가며, 간단한 폐쇄 분쇄 회로를 실험 계획법을 적용하여 설계하였다. 또한 실험결과를 다구치 방법의 S/N비를 이용하여 간단하면서도 신뢰도를 가질 수 있는 분석을 적용해 보았다. 실험 결과 두 단계의 분쇄 공정 중 첫 번째 단계보다 두 번째 단계에서의 스크린의 크기가 전체 입도 분포에 가장 많은 영향을 주었다. 하지만 두

변수 모두 실험결과에 유의한 인자이므로 그 최적의 조건은 첫 번째 스크린의 크기가 3 mm, 두 번째 스크린의 크기가 1.3 mm일 때 목적하는 입도 분포에 충족하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 다구치 방법으로 얻은 S/N비를 활용하여 유의수준 0.05의 최적 조건의 S/N비 예측을 실시하고 확인 실험을 실시한 결과, 구간 예측 사이의 S/N비를 나타냈으므로 본 실험의 재현성을 확보하였다고 말할 수 있다. 이번 연구의 결과로 건조되지 않은 원광 상태의 갈탄을 해머밀로 분쇄할 때, 다른 분쇄 공정 변수를 고정하여도 스크린의 크기만으로 목적하는 입도분포의 미분을 생산할 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 연구는 지식경제부 일반사업인 ‘광물자원으로부터 나노소재의 원료물질 제조기술개발’ 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

김기도, 김희택 (2005) 최적화 실험 설계의 이론과 적용. 한양대학교출판부, 서울, 136-140.
박종력, 김병곤, 전호석, 최홍일 (2010) 청정석탄개발 및 활용기술에 대한 특허정보분석. 한국지구시스템공학회지, 47, 214-221.

이시훈, 김상도 (2008) 저등급석탄으로부터 초정정석탄 제조기술. 한국화학공학회지, 46, 443-450.
조재립 (2005) 실험통계학. 청문각, 405-429.
Aslan, N. (2010) An optimization of calcite grinding using the taguchi method with multiple performance characteristics. Journal of engineering and applied sciences, 2, 104-111.
Eswaraiah, C., Anshul Gupta, Nagarajan, R., Rajavel, M., and Nandakumar K. (2008) Minimization of fines generation in size reduction of coals by impact crusher. Fuel Processing Technology, 89, 704-714.
International Energy Agency (2010) IEA Statistics Coal information 2010. International Energy Agency, I13-I129.
Meyers, R.A., Laskowski, J.S., and Walters, A.D. (2001) Encyclopedia of Physical Science and Technology 18e Coal Preparation. Academic press, Maryland Heights, 82p.
Pignatiello, J.J. (1988) An overview of strategy and tactics of Taguchi. IEE Trans., 20, 247-254.
Speight, J.G. (2005) Handbook of coal analysis. John Wiley & Sons, New Jersey, 161p.
World Coal Institute (2009) A comprehensive overview of coal report 2009. WCI, 19-29.

접수일(2010년 9월 11일), 수정일(1차 : 2010년 9월 20일), 게재확정일(2010년 9월 23일)