

볼밀링에서 볼 배합비 선택을 위한 혼합물 실험계획 및 분석

김성준^{*†} · 최재영^{*} · 신현호^{**}

^{*} 강릉원주대학교 산업공학과

^{**} 강릉원주대학교 세라믹신소재공학과

Design and Analysis of Mixture Experiments for Ball Mix Selection in the Ball Milling

Seong-Jun Kim^{*†} · Jai Young Choi^{*} · Hyunho Shin^{**}

^{*} Department of Industrial Engineering, Gangneung-Wonju National University

^{**} Department of Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University

ABSTRACT

Purpose: Ball milling is a popular process for obtaining fine powders in the part and material industry. One of important issues in the ball milling is to produce particles with a uniform size. Although many factors affect uniformity of particles, this paper focuses on the choice of ball diameter. Consider a ball milling where balls can be taken with three different diameters. The purpose of this paper is to find a ball mix which minimizes the average particle size.

Methods: Ball diameters are selected as 10mm, 3mm, and 0.5mm. In order to find an optimum mixing ratio, the method of mixture experiments is employed in this paper. Taguchi's signal-to-noise ratio (SNR) for small-er-the-better type is also used to analyze experimental data.

Results: According to the experimental result, SNR is maximized when the ball mix is taken as either 7:3:0 or 6:4:0. Such mixing ratios can be technically validated in terms of porosity reduction.

Conclusion: The ball mixing technique presented in this paper provides a useful way to improve the production efficiency with a low cost.

Key Words: Ball Milling, Mixture Experiment, Optimum Mix, Particle Size, Signal-to-Noise Ratio, Porosity

● Received 31 July 2014, 1st revised 28 August 2014, accepted 28 November 2014

† Corresponding Author(sjkim@gwnu.ac.kr)

© 2014, The Korean Society for Quality Management

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.

* This work was supported by National Research Foundation (NRF-2009-0069111).

1. 서론

분쇄는 기계적인 힘을 가함으로써 고체를 보다 작은 크기로 만드는 작업으로서 그 크기에 따라 조분쇄, 중분쇄, 미분쇄, 초미분쇄로 분류할 수 있다. 볼밀링은 이 중 미분쇄에 속하며, 세라믹 공정에서 원료 분말을 미분으로 분쇄하거나 재료배합을 목적으로 가장 많이 사용되는 방법 중 하나이다(Shin, 2009). 특히 볼밀링은 설치 및 운용 비용이 저렴하고 다양한 재료를 비교적 쉽게 다룰 수 있다는 장점이 있어 소재 분야 기업 현장에서 널리 채택되고 있다(Shin et al., 2013).

볼밀링의 원리는 stone이나 플라스틱 재질의 실린더형 용기에 단단한 zirconia 볼을 넣어 회전시킴으로써 텀블링에 의한 충격이나 전단력, 마찰력 등을 이용하여 원료를 분쇄하는 것이다(Shin, 2009). 이때 주어진 시간 내에 세라믹 원료의 입도(粒度)가 고르고 작게 되도록 하는 것이 현업에서는 중요한 관심사이다. 분쇄된 미세분말은 PCB, 콘덴서, 유전체 등 각종 전자부품의 제작에 이용되는 데 최근 ICT 기기의 경박단소화에 따라 그 물성과 품질에 대한 요구가 높아지고 있기 때문이다. 따라서 분말의 입도는 볼밀링 작업을 평가하는 주요한 성능측도가 된다. 일반적으로 입도는 볼의 크기, 경도, 강도, 무게, 양 등에 크게 의존하며 회전속도, 밀링시간, 적재량 등 밀링조건에도 많은 영향을 받는다. 특히 용기 내의 볼과 분말원료의 기공률(氣空率, porosity)은 입도와 밀접한 상관관계를 갖기 때문에(Mota et al., 2001), 볼의 크기와 양은 이를 고려하여 결정되어야 한다. 선행연구에서는 바로 이 점에 착안하여, 볼밀링에서 여러 가지 크기의 볼을 동시에 이용하는 방안을 제시하고 그 최적 배합비를 찾기 위해 혼합물 실험계획법의 적용을 검토하였다(Choi and Kim, 2011; Kim and Choi, 2012; Kim et al., 2013). 하지만 기공률 관점에서의 검토가 이루어지지 않은 관계로 최적조건에 대한 기술적 해석은 미흡하였다. 또 다른 관련 연구로서 Akkurt et al.(2007)은 3종의 미세분말로 제작된 혼합물의 기공률을 예측하는 방법을 개발하였으나 분말크기 간의 차이가 너무 큰 경우(350:30:3)를 다루고 있고 혼합물 소결조건에 따라 측정결과가 영향을 받기 때문에 본 논문의 볼 배합비 결정에 활용하기는 한계가 있다.

본 논문의 목적은 직경이 10mm, 3mm, 0.5mm인 볼을 동시에 사용할 때 분쇄효율을 가장 높게 하는 최적 배합비를 찾는 데 있다. 실험을 통해 데이터를 수집하고 볼 배합비와 분말입도 간의 경험적인 모델을 얻기 위해 혼합물 실험계획법을 채택하였다. 이 기법을 이용하면 볼 배합을 위한 무수히 많은 조합 중에서 일부 선택된 조합에서만 실험을 수행하는 것이 가능하다. 각 배합조건에 따른 볼밀링 실험은 본교의 Nano Ceramics Lab.에서 운용 중인 실험장비를 이용하여 수행되었다. 실험의 계획과 진행에 대해서는 2장에서 다시 기술될 것이다. 3장은 실험데이터 분석내용을 설명하고 특히 최적 배합비 결정을 위해 망소특성의 S/N비를 채용한다. 이는 분말입자의 평균과 산포를 동시에 최소화하는 조건을 찾기 위함이다. 최적조건에 대한 기공률 관점에서의 기술적 해석 역시 3장에서 제시된다. 실험계획 및 분석을 위한 통계처리 소프트웨어는 Minitab R14 영문판을 이용한다. 마지막 4장은 본 연구내용의 요약과 함께 그 의의 및 한계점에 대해 논의하기로 한다.

2. 실험계획 및 볼밀링과정

2.1 실험계획

볼밀링은 툴 역할을 하는 볼과 분쇄할 원료를 적재한 실린더형 용기를 회전시킴으로써 진행되는 데 Figure 1은 이를 개략적으로 도시하고 있다.



Figure 1. A schematic illustration of ball milling (http://en.wikipedia.org/wiki/Ball_mill)

즉 용기가 회전하면서 텀블링이 발생하고 이로 인한 충격, 진단력, 마찰력 등으로 원료를 분쇄하는 것이다. 분쇄된 분말의 입도는 볼밀링의 효율을 평가하는 데 중요한 요소로서 볼 사양과 밀링조건 등 다양한 변수의 영향을 받는다. 이를 특성요인도로 나타내면 Figure 2와 같다.

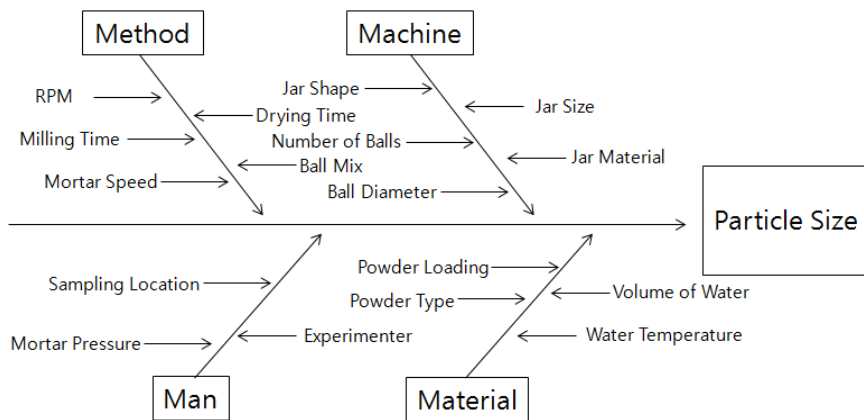


Figure 2. A cause and effect diagram of ball milling

비록 <그림 2>의 많은 공정변수가 볼밀링의 효율에 영향을 주지만 본 논문에서는 가장 기초가 되는 볼의 크기와 양을 결정하는 문제에 초점을 둔다. 공정변수와 혼합비를 동시에 다루는 문제에 대해서는 Lim(2011)의 연구를 참고하기 바란다.

Figure 1에서 짐작할 수 있듯이, 볼의 크기가 너무 크면 볼 사이의 틈이 커져서 밀링이 원활하게 진행되기가 어렵고, 반면 볼밀의 크기가 너무 작으면 틈은 줄어들지만 운동에너지가 저하되어 분쇄효율이 떨어진다(Shin et al., 2013). 이러한 문제점을 보완하기 위해 다양한 크기의 볼을 동시에 사용하는 방안을 검토하고 실험계획법을 통해 분쇄효율을 높일 수 있는 볼의 최적 배합비를 결정하는 것이 논문의 목적이다.

볼밀링에서 사용 가능한 볼의 직경은 보통 0.25mm에서 80mm로 분포하지만(Shin, 2009), 실험실의 R&D 단계에서는 0.5mm에서 10mm가 널리 쓰이고 있다(Shin et al., 2013). 본 실험에서는 이 점을 고려하여 3가지 볼의 직경을 10mm, 3mm, 0.5mm으로 설정하기로 한다. 또한 볼의 직경을 선택할 때 큰 직경 D와 작은 직경 d가 이루는 비율 D/d는 대략 3보다 커야 가공률이 높아져서 분쇄효율에 좋아지는 것으로 알려져 있다(Mota et al., 2001). 본 연구에

서 정한 3가지 직경은 모든 조합에서 D/d가 3보다 큼을 알 수 있다. 그러면 직경이 10mm, 3mm, 0.5mm인 볼의 비율을 각각 x_1, x_2, x_3 로 나타내기로 하자. 실험진의 사전경험과 문헌조사에 따르면, 큰 직경 볼이 작은 직경 볼보다 많을 때 분쇄효율이 더 양호한 것으로 나타났다. 이에 대한 자세한 논의는 3.3절에서 제공될 것이다. 이러한 점을 종합적으로 고려하여 본 실험에서는 볼 배합비의 범위를 다음과 같이 정하기로 한다.

$$\begin{aligned} 0.3 &\leq x_1 \leq 0.7 \\ 0.2 &\leq x_2 \leq 0.6 \\ 0.0 &\leq x_3 \leq 0.3 \end{aligned} \tag{1}$$

단, $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ 임은 물론이다.

식 (1)의 제약조건을 만족하는 조합은 무수히 많으므로 실험을 위해서는 일부 조합을 선택해야 한다. 이러한 문제는 전통적으로 혼합물 실험계획법 (Design of Mixture Experiment)에서 다루어 왔으며 최근 혼합물의 품질 및 공정 개선을 위해 국내에서도 널리 활용되고 있다(Lim, 2011; Kim and Park, 2010). 혼합물 실험계획법에 관한 자세한 소개는 Park(2010)의 16장을 참고하기 바란다. 또한 본 논문에서는 혼합물 실험계획을 적용하기 위한 통계처리 소프트웨어로 Minitab을 이용하기로 한다. Minitab의 실험계획 기능에서 Mixture Experiment를 선택하면 식 (1)을 만족하는 실험조합을 경제적으로 구성한 실험계획표를 얻을 수 있다. Figure 3은 Minitab을 이용해서 얻은 Simplex Design Plot으로서 전체 실험영역을 보여주고 있다.

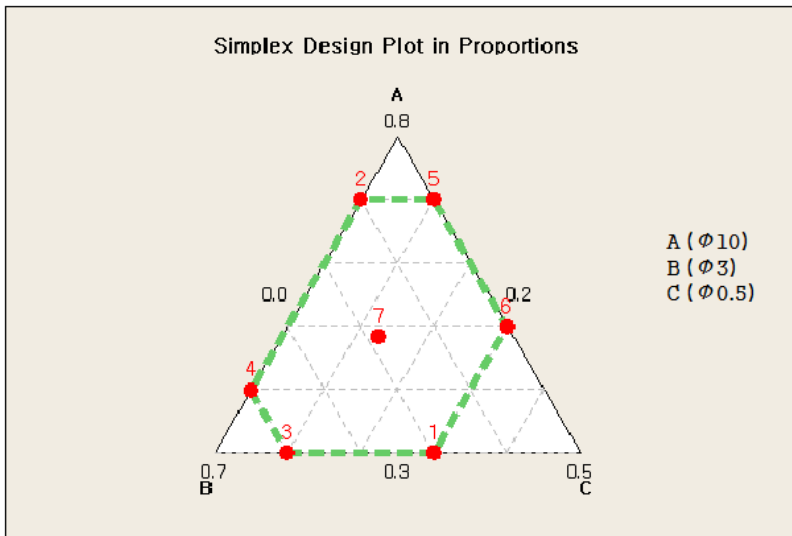


Figure 3. Simplex design plot for ball milling experiment

Figure 3의 A, B, C는 곧 x_1, x_2, x_3 를 각각 나타내며 식 (1)의 제약을 반영하기 위해 Extreme Vertices Design (EVD)을 채택한 것이다. 또한 그림에서 붉은 점으로 표시한 지점이 바로 실험이 수행될 배합조건을 의미하는 데 이들을 수치화하여 정리하면 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Table of mixture experiment by EVD

StdOrder	PtType	A ($\phi 10$)	B ($\phi 3$)	C ($\phi 0.5$)
1	1	0.3	0.4	0.3
2	1	0.7	0.3	0
3	1	0.3	0.6	0.1
4	1	0.4	0.6	0
5	1	0.7	0.2	0.1
6	1	0.5	0.2	0.3
7	0	0.483333	0.383333	0.133333

표의 실험조건은 Figure 2에 붉은 숫자로 나타낸 StdOrder를 보면 그림에 어떤 지점에 해당되는지 알 수 있다. 참고로 Table 1에서 PtType이 1인 것은 꼭지점, 0인 것은 중심점을 각각 의미한다.

2.2 실험과정

볼밀링 실험을 위한 볼은 zirconia 재질로서 3가지 직경 10mm, 3mm, 0.5mm를 선택하고 분쇄할 원료는 산화알루미늄 분말인 Al_2O_3 로 한다. Al_2O_3 는 PCB제작을 위한 세라믹 시트의 원료로서 스마트기기의 대중화에 따라 최근 현장에서도 작업요청이 크게 증가하고 있는 품목이다. 세라믹 시트의 품질보증을 위해서는 Al_2O_3 분말의 입도가 작고 고른 것이 바람직하다. 분쇄대상 Al_2O_3 는 평균입도가 $6\mu m$ 이고 순도가 99.6%인 국내 K사 제품을 이용하기로 한다.

볼밀용기는 플라스틱 재질의 평범한 물통으로서 직경은 60mm이고 용량은 250ml이다. 용기에는 Al_2O_3 분말 20g과 볼 500g이 적재된다. 또한 분말의 유동을 돕기 위해 증류수 약 40g이 추가로 투입된다. Figure 4는 실험실용 장비인 Universal Ball Mill(모델명: UBM-200S, SPG社)에 볼밀용기를 장착하여 볼밀링을 수행하는 장면을 보여준다.

**Figure 4.** Universal ball mill for the experiment

Figure 4에서 보는 것처럼, 볼밀용기는 샤프트 위에서 회전하게 되고 장비 우측에는 시간과 회전속도를 설정할 수 있는 패넬이 있다. 본 실험에서는 12시간, 30.5rpm으로 설정하였다. 또한 실제 실험에서는 볼밀용기가 샤프트

위에서 헛도는 것을 방지하기 위해 불밀용기에 청테이프와 고무밴드를 감아서 사용하였다.

본 실험은 크게 불밀링, 건조, 입도분석의 3단계로 구성된다. 첫 번째 단계인 불밀링은 앞에서 준비한 내용에 따라 진행된다. 불은 총 500g이 적체되므로 Table 1의 배합비율은 Table 2와 같이 중량으로 다시 쓸 수 있다.

Table 2. Table of mixture experiment presented by real weights

StdOrder	PtType	A (ϕ 10)	B (ϕ 3)	C (ϕ 0.5)
1	1	150.00	200.00	150.00
2	1	350.00	150.00	0.00
3	1	150.00	300.00	50.00
4	1	200.00	300.00	0.00
5	1	350.00	100.00	50.00
6	1	250.00	100.00	150.00
7	0	241.67	191.67	66.67

불밀링이 완료되면 불과 시료를 분리하고 시료를 건조한다. 건조는 80°C의 건조기에 12시간 건조 과정을 통해 Mortar 형태의 시료를 가루로 만드는 과정으로 건조 및 분쇄가 완료된 시료는 입도분석장비 (Model S3500, Microtrac, Largo, FL, USA)를 이용하여 입도를 측정한다. 입도분석 결과는 아래 Figure 5와 같이 제시되며 평균, 표준편차, 중위수 등 주요 추정치를 얻을 수 있다.

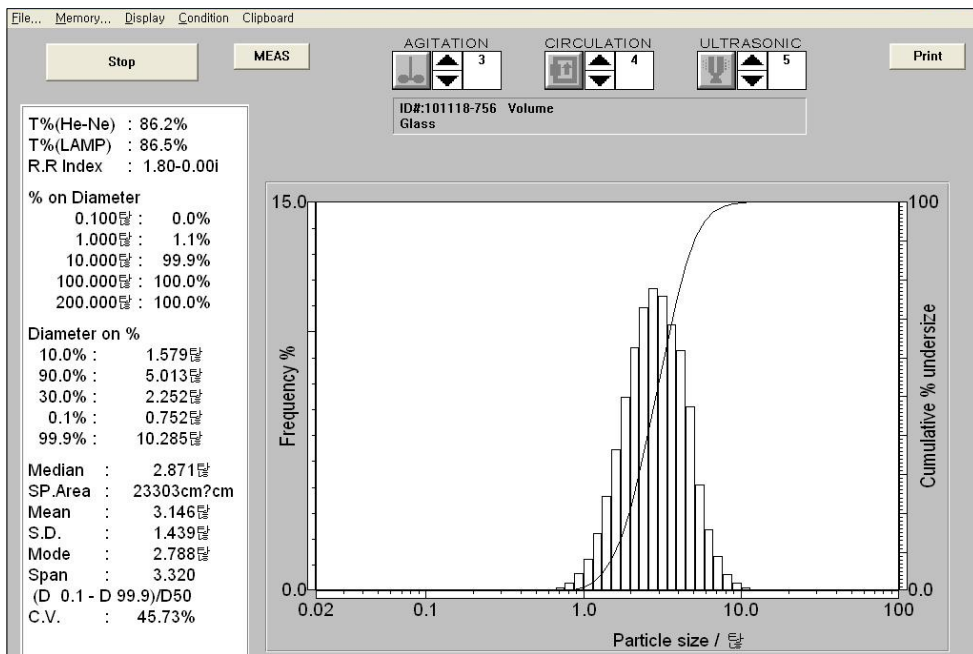


Figure 5. An illustration of particle size analysis

3. 데이터 분석 및 배합비 결정

3.1 실험데이터

앞서 언급한 바와 같이, 볼밀링에서 가장 중요한 품질특성은 분쇄된 분말의 입도이다. 주어진 조건에서 입도의 평균은 작고 균일한 것이 바람직하므로 다구치가 제안한 망소특성의 S/N비를 이용하여 데이터분석을 진행하고자 한다. 망소특성의 S/N비는 Figure 5의 입도분석 결과로부터 주어지는 평균과 표준편차를 각각 m 과 s 라 하면 다음 수식으로 구할 수 있다.

$$S/N = -10 \log(m^2 + s^2) \quad (2)$$

단, S/N비에 관한 배경과 의미에 대해서는 Rhee(2001)의 비교연구 또는 Yum et al.(2013)의 튜토리얼 논문을 참고하기 바란다. 각 실험조건에서의 S/N비 계산결과를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3. S/N ratio of ball milling experiment

StdOrder	S/N ratio
1	-10.7519
2	-7.8255
3	-9.1101
4	-8.5427
5	-10.0989
6	-11.0889
7	-9.5391
8	-9.8522

Table 3의 실험번호 8번은 오차추정을 돕기 위해 중심점에서 한차례 더 반복실험을 수행한 것이다. 실험결과, 배합비율을 7:3:0으로 적용한 실험번호 2번에서 S/N비가 가장 큰 것으로 나타났으며 반대로 실험번호 1번, 5번, 6번은 S/N비가 작은 값으로 얻어졌다. 예상컨대, 직경이 0.5mm인 볼 C는 S/N비에 도움이 되지 않은 것으로 판단된다.

3.2 S/N비 분석

S/N비 분석을 위해 Minitab을 이용하여 Mixture Regression을 수행한다. Minitab 분석에서는 다음의 2차 모델을 디폴트로 제시한다.

$$E(S/N) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (3)$$

분석결과 결정계수는 94.16%로 나타났고 모델링 결과는 비교적 양호하다고 판단되었지만 보다 최선의 모델을 선택하기 위해 Stepwise Regression을 수행하기로 한다. 이 때 α_{in} 과 α_{out} 은 모두 0.2로 설정한다. 이렇게 해서 추정된 회귀식은 다음과 같다.

$$\widehat{S/N} = -7.9401x_1 - 8.7918\beta_2 x_2 - 10.1824x_3 - 17.6689x_1 x_3 \quad (4)$$

이 때 결정계수는 92.30%, 수정된 결정계수는 86.53%였으므로 모형의 적합도는 충분하다고 하겠다. 또한 식 (4)에 대한 통계적 유의성을 검토하기 위해 분산분석을 실시한 결과는 아래의 표와 같다.

Table 4. ANOVA table of S/N ratio in ball milling experiment

Analysis of Variance for S/N (pseudocomponents)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	7.72265	7.72265	2.57422	15.99	0.011
Linear	2	7.26448	4.14972	2.07486	12.89	0.018
Quadratic	1	0.45817	0.45817	0.45817	2.85	0.167
A*C	1	0.45817	0.45817	0.45817	2.85	0.167
Residual Error	4	0.64390	0.64390	0.16098		
Lack-of-Fit	3	0.59487	0.59487	0.19829	4.04	0.347
Pure Error	1	0.04904	0.04904	0.04904		
Total	7	8.36655				

표에서 알 수 있듯이, 회귀모형에 대한 P값은 0.011이므로 식 (4)는 통계적으로 충분히 유의하다고 판단된다. 분산분석표를 통해 결정계수 계산결과도 다시 확인해보면 각각 다음과 같다.

$$R^2 = 1 - \frac{S_{Error}}{S_{Total}} = 1 - \frac{0.64390}{8.36655} = 0.9230$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{S_{Error}/(n-p)}{S_{Total}/(n-1)} = 1 - \frac{0.64390/4}{8.36655/7} = 0.8653$$

세 가지 배합비가 S/N비에 대해 어떻게 영향을 미치는지 파악하기 위해 Cox의 반응추적도 (Response Trace Plot)를 작성하면 Figure 6과 같다. 이 그림은 혼합물설계에서 주효과도 역할을 한다. Figure 6을 보면, 배합비를 기준점보다 높이거나 낮출 경우 S/N비가 어떻게 변화하는지 알 수 있다. 그림에서 기준점은 Figure 3의 중심점으로 설정되어 있다. 예를 들어, 볼 A의 비율이 증가할 때 S/N비도 증가함을 알 수 있으며 볼 B의 경우도 마찬가지이다. 반대로, 볼 C는 비율을 낮추어야 S/N비가 증가하게 된다. 특히 볼 C의 반응추적선이 급한 기울기를 나타내고 있으므로 기준점 부근에서는 볼 C의 비율이 S/N비에 영향을 큼을 알 수 있다.

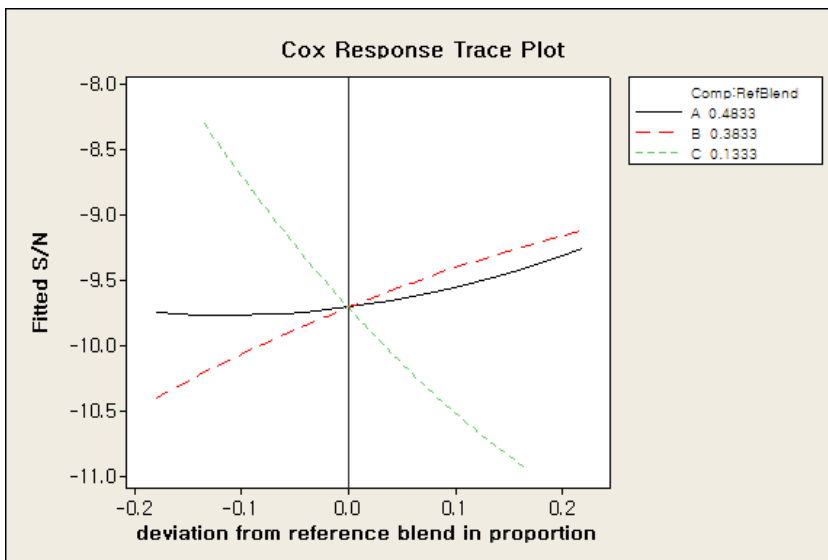


Figure 6. Cox's response trace plot of S/N ratio

심플렉스 실험영역에서 S/N비의 변화를 묘사하기 위해 등고선도를 작성하면 Figure 7과 같다. 참고로, 그림 내에 점선으로 표시한 화살표는 S/N비가 증가하는 방향을 보여준다. 즉 중심점을 기준으로 11시 방향으로 S/N비가 증가하고 있으며 반대로 4시 방향으로는 S/N비가 감소하고 있다. 즉 볼 C의 비율을 낮추면 S/N비 증가에 도움이 되며 회귀모형의 2차 효과는 점차 악화되고 있음을 등고선도로부터 관찰할 수 있다.

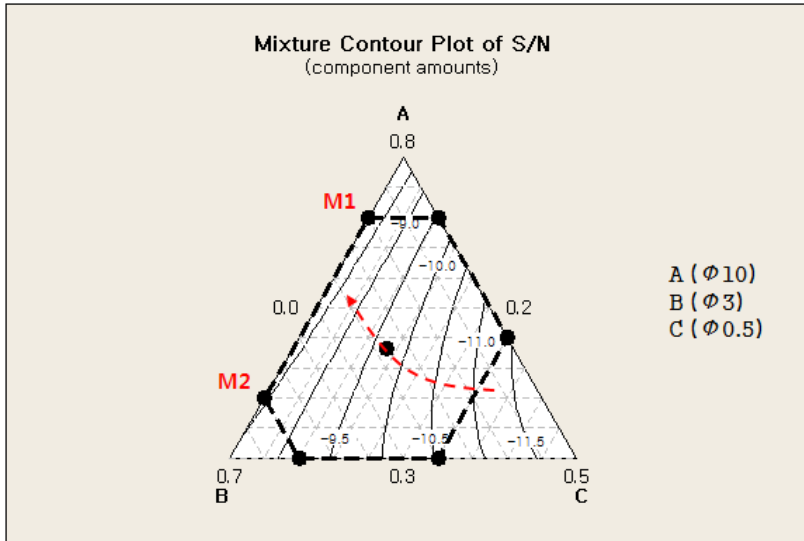


Figure 7. Mixture contour plot of S/N ratio

따라서, S/N비를 가장 크게 하는 배합비는 Figure 7의 M1과 M2 사이에서 찾을 수 있음을 알 수 있으며 M2보다는 M1에 가까울 것으로 예상된다. 단 M1과 M2는 $(x_1, x_2) = (0.7, 0.3)$ 과 $(x_1, x_2) = (0.4, 0.6)$ 을 각각 나타낸다.

3.3 이론적 고찰 및 최적배합비 결정

실험진의 선행연구와 경험으로 볼 때, 서로 크기가 다른 볼을 혼합했을 때 발생하는 기공률은 볼밀의 분쇄효과와 밀접한 관계가 있다. 기공률이란 혼합물의 전체 부피 중 기공이 차지하는 비율을 말한다(Shin, 2009). 즉 기공률이 낮을수록 분쇄효과가 더 높아질 것이므로 기공률을 최소화하는 배합비가 선호된다는 것이다. Mota et al.(2001)의 연구에 따르면, 2종의 크기를 가진 입자로 구성된 혼합물에 대한 기공률 ϵ 은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\epsilon = \left[1 - (1 - \epsilon_D^0)w_D^{1.35 - w_D F} \right] \cdot \left[\epsilon_d^0 + (1 - \epsilon_d^0)w_d^f \right] \tag{5}$$

단, w_D 는 혼합물 내에서 크기가 큰 입자의 비율을 나타내며, ϵ_D^0 는 크기가 큰 입자만으로 구성할 때의 기공률을 의미하고 ϵ_d^0 작은 입자만으로 구성할 때의 기공률을 나타낸다. 또한 D 와 d 를 각각 큰 입자와 작은 입자의 직경이라고 할 때 식 (5)의 F 와 f 는 다음 식으로 구한다. 단, $\delta = d/D$ 이다.

$$F = \left[0.27 + 1.55 / \left\{ 1 + \exp\left(-\frac{\delta + 0.06}{0.27}\right) \right\} \right]^{-1} \quad \text{and} \quad f = 5 + 4\sqrt{\delta}$$

식 (5)를 이용하여 Mota et al.(2001)은 $\delta = 0.3$ 의 경우 $(x_1, x_2) = (0.6, 0.4)$ 부근에서 기공률이 최소화되는 것으로 예측하였으며 이를 실험적으로도 뒷받침하였다. 실제로 x_1 과 x_2 의 비율에 따라 기공률이 어떻게 변화하는지 확인하기 위해 식 (5)에 $D = 10, d = 3$ 를 대입하면 Figure 8의 결과를 얻을 수 있다. 단 $w_D = x_1 / (x_1 + x_2)$ 이다.

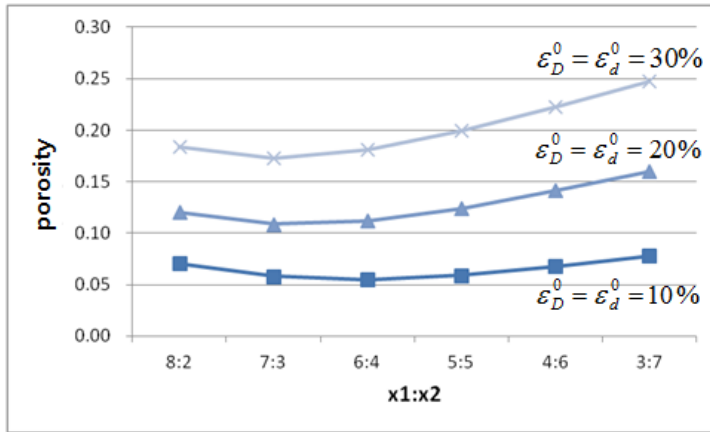


Figure 8. Mixture porosity with its ball mixing ratio

그림을 보면 기공률은 대체로 ϵ_D^0 혹은 ϵ_d^0 가 증가함에 따라 커지는 경향을 보이지만, ϵ_D^0 가 작을 때는 $x_1 : x_2$ 를 6:4로 선택하고 반대로 ϵ_D^0 가 클 때에는 7:3으로 하는 것이 가장 낮은 기공률을 가져온다는 것을 알 수 있다. 이 내용은 우리가 3.2절에서 S/N비로 분석한 결과와도 일치하는 것이다. 따라서 혼합물실험계획에 의한 통계적 분석결과는 실험진의 경험에 부합하며 기술적 측면에서도 신뢰할 수 있다고 볼 수 있다.

상기 내용을 종합할 때, 볼 배합비는 7:3:0 혹은 6:4:0으로 하는 것이 가장 바람직할 것으로 보이며 각각의 S/N비 추정치와 신뢰구간은 Minitab에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\widehat{S/\widehat{N}}_{7:3} = -8.1956 \pm 0.9730 = (-9.1686, -7.2226)$$

$$\widehat{S/\widehat{N}}_{6:4} = -8.2808 \pm 0.7185 = (-8.9993, -7.5623)$$

배합비 7:3:0 쪽의 신뢰구간이 더 넓은 이유는 이 조건이 심플렉스 실험영역의 중심점에서 더 먼 곳에 위치하므로 그 분산이 커지기 때문이다. 수치 상으로는 두 조건의 통계적 유의차는 거의 없으므로 최적 배합비의 최종선택은 작업시간이나 밀링조건 등 실무적인 요인을 고려해야 한다.

4. 결 론

소재 분야의 중소기업 현장에서 볼밀링은 재료의 분쇄를 위해 널리 채택되고 있다. 제한된 시간 내에 입자의 크기가 미세하고 더 일정한 분말을 얻을 수 있다면 품질 뿐 아니라 생산성 측면에서도 기여하는 바가 클 것이다. 본 논문에서는 볼밀링에서 서로 다른 크기의 볼을 사용할 경우 혼합물 실험계획법을 통해 볼의 최적 배합비를 찾는 방법을 다루었다. 주어진 가공시간에서 볼 배합비의 선택이 분쇄효율과 분말입도에 유의한 영향을 미침을 확인할 수 있었고

가장 바람직한 결과를 가져오는 배합비를 제안하였다. 특히 선행연구에서는 다루지 못했던 기공률 관점에서의 논의를 보완함으로써 본 실험결과와 타당성을 검증하였다. 비록 실험실 수준에서 수행된 연구이지만 본 논문의 결과는 볼밀링 작업의 효율개선에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다. 물론 본 논문은 볼 배합비의 결정에 초점을 두었으므로 볼밀링 파라미터를 실험에 포함시키지 못한 한계가 있다. 따라서 회전수, 분말적재량, 밀링시간, 증류수의 양 등의 파라미터 설정이 볼밀의 직경과 배합비에 어떤 영향을 미치는지 민감도분석이 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Akkurt, S., Romagnoli, M., and Sutcu, M. 2007. "DOE and ANN models for powder mixture packing." *American Ceramic Society Bulletin* 86(7):9101-9111.
- Choi, J., and Kim, S. J. 2011. "An optimal determination of ball mill mix using design of mixture experiments." *Proceedings at The Spring Meeting of the Korean Institute of Industrial Engineers* 1369-1374, Incheon.
- Kim, S. J. and Choi, J. 2012. "Determination of ball mill mix using design of mixture experiments." *Proceedings at The Spring Conference of Korean Society for Quality Management*, Seoul.
- Kim, S. J., Choi, J., and Shin, H. 2013. "A process improvement for ball milling using mixture experiments and Taguchi methods." *Proceedings at The Spring Meeting of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Yeosu.
- Kim, S. J. and Park, J. I. 2010. "An optimal tolerancing of the mixture ratio with variance considerations." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 38(4):580-586.
- Lim, Y. 2011. "Practical designs for mixture component-process experiments." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 39(3):400-411.
- Mota, M., Teixeira, J. A., Bowen, W. R., and Yelshin, A. 2001. "Binary spherical particle mixed beds: porosity and permeability relationship measurement." *Transactions of the Filtration Society* 1(4):101-106.
- Park, S. 2010. *Design of Experiments*, 10th ed. Minyoungsa.
- Rhee, S. 2001. "A comparative analysis of three signal-to-noise ratios of dynamic characteristics parameter design." *Journal of the Korean Society for Quality Management* 29(3):82-91.
- Shin, H. 2009. *Fundamentals of Ceramic Engineering*. Books Hill.
- Shin, H., Lee, S., Jung, H. S., and Kim, J. B. 2013. Effect of ball size and powder loading on the milling efficiency of a laboratory-scale wet ball mill. *Ceramic International* 39, 8963-8968.
- Yum, B. J., Kim, S. J., Seo, S. K., Byun, J. H., and Lee, S. H. 2013. "The Taguchi Robust Design Method : Current Status and Future Directions." *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers* 39(5):325-341.

