

분말 가압 성형 공정 변수 최적화에 관한 연구

김정래¹, 김영탁²

Study on the Optimization of Powder Compaction Process Parameters

J. L. Kim¹ and Y. T. Keum²

Abstract

In this study, the process parameters in powder compaction are optimized for getting high relative densities. To find optimized parameters, the analytic models of powder compaction are firstly prepared by 2-dimensional rod arrays with random green densities using a quasi-random multi-particle array. Then, using finite element method, the changes in relative densities are analyzed by varying the size of the particle, the amplitude of cyclic compaction, and the coefficient of friction, which influence the relative density in cyclic compactions. After the analytic function of relative density associated process parameters are formulated by aid of the response surface method, the optimal conditions in powder compaction process are found by the grid search method.

Key Words : Powder Compaction, Optimization, Response Surface Method, Cyclic Pressure, Finite Element Analysis

1. 서론

분말 압축 성형 공정은 그 자체만으로 우수한 물성의 제품을 소결 공정 전에 고밀도를 얻기 위해 반드시 거쳐야 하는 과정이다. 상대밀도는 세라믹 제품 평가의 주요 요소로 압축 성형 공정부터 고밀도를 얻기 위해 많은 연구가 진행되어 최근에는 압축성형시 고밀도를 얻을 수 있는 최적의 파라미터 값을 찾으려는 노력이 집중되고 있고 이런 동향과 함께 실제 압축성형의 모델링 연구로서 Keum 등[1]은 임의의 초기 밀도를 가지는 분말 성형체를 모델링 하였다.

기존 연구에서는 분말 가압 성형 공정에 대한 실험적인 연구가 수치해법을 이용한 정량적 분석과 최적화 등의 방법으로 진행되었다. 그러나, 이런 이상모델은 실제 성형현상과 차이가 있으므로 보다 우수한 물성의 부품을 성형하는 분말 압축성형 공정의 효율성 향상을 위해 실제

압축성형 공정에 대한 전산모사를 통한 공정 파라미터의 최적화가 필요하다.

본 연구에서는 상대밀도에 영향을 미치는 입자 크기, 반복 가압 진폭, 마찰 계수를 세라믹스 분말 압축성형 공정의 설계변수로 하고 완전계승 계획법(full factorial design : FFD)을 이용하여 적절한 실험점을 선정하였으며, 관심 실험영역에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 회귀모델로 반응 표면 모델을 생성하였다. 그리고 격자 탐색법을 이용하여 관심 실험 영역에서 상대밀도를 극대화시키는 공정 변수를 예측하였다.

2. 공정변수 최적화

2.1 반응표면법

공정변수 최적화는 다음과 같이 수식화된다.

$$\begin{aligned} &\text{maximize} && y = f(x) \\ &\text{subject to} && g_i(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

1. 한양대학교 일반대학원 정밀기계과, 현재 삼성전자 근무
2. 한양대학교 CPRC 기계공학부

여기서 y 는 목적함수이며, x 는 설계변수이고, $g_i(x)$ 는 제한조건이다. 설계변수의 갱신은 다음 식에 따른다.

$$x_{k+1} = x_k + a_k S_k \quad (2)$$

여기서 k 는 반복횟수, S_k 는 탐색방향 벡터, a_k 는 탐색거리이다. 먼저 S_k 를 구하고 다음 단계에서 목적함수가 최대가 되도록 하는 a_k 를 구한다. 설계변수의 목적함수 민감도(sensitivity) 계산을 바탕으로 목적함수를 극대화시킨다.

본 연구에서는 Box와 Wilson[2]의 반응표면분석법(response surface method)을 목적함수의 최적화 도구로 사용하였고 이로써 설계변수의 민감도를 간단하게 구할 수 있다. 목적함수 y 를 해석 결과로부터 다음과 같이 근사화된 함수 \bar{y} 로 대치한다[3-4].

$$\bar{y} = X\beta \quad (3)$$

여기서 $\beta = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n]^T$ 는 회귀 계수 벡터이고, X 는 설계변수 다항식 벡터이다. β 는 다음 식과 같이 목적함수 값과 근사함수 값의 차이의 제곱의 합을 최소화하는 값으로 구할 수 있다.

$$\beta = (X^T X)^{-1} Xy \quad (4)$$

2.2. 실험계획법

Al_2O_3 입자 크기, 반복 가압 진폭 크기, 마찰계수를 설계변수 인자로 3인자 3수준으로 한 완전 중심계획법(FFD)[5]을 사용하였으며, 관심 실험영역(region of interest)은 Table 1과 같이 설정하였다. 목적함수의 값은 1회 가압시 상대밀도와 1000회 반복 가압시 상대밀도의 차로 하였다.

Table 1 Factors and levels for experimental design.

Factor	Factor name	Coded variable			
		-1 level	0 level	1 level	
Natural variables	ξ_1	Al_2O_3 입자 크기 [μm]	7.5	15	22.5
	ξ_2	반복가압 진폭크기 [MPa]	125	100	75
	ξ_3	마찰 계수	0.1	0.3	0.5

2.3. 해석 모델링

압축 분말체를 2 차원 막대 배열 성형으로 모델링[1]하였다. Al 입자의 크기는 15 μm 로 고정하고, Al_2O_3 입자 크기는 7.5 μm , 15 μm , 22.5 μm 로 각각 모델링 하였다. Fig. 1.와 같이 Al_2O_3 가 7.5 μm 인 모델을 model 1, Al_2O_3 가 15 μm 인 모델을 model 2, Al_2O_3 가 22.5 μm 인 모델을 model3 라 하였다. 각 모델의 초기 상대밀도는 0.554, 0.607, 0.61 이다.

2.4. 수치해석

세라믹 분말 가압성형 공정을 유한요소 해석하기 위하여 부여한 경계 조건은 다음과 같다. 상편 치에는 Fig. 2와 같이 싸이클 주파수 1Hz로하여 최대압력 하중 P_{max} = 125MPa로 고정한 후, ΔP 를 각 125MPa, 100MPa, 75MPa에 대하여 1000회 반복 가압하였다. 그리고 펀치, 다이, 그리고 세라믹 분말간의 마찰계수는 0.2[6], 세라믹 분말들간의 마찰계수는 0.1, 0.3, 0.5일 때를 각각 고려하였다.

Al_2O_3 입자 크기, 반복 가압 진폭 크기, 마찰계수에 따라 총 27 회의 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 3 은 simulation no. 1 인 경우 해석 결과이다. Table 2 는 각 simulation 에 따른 해석결과이다. 0, 1, 10, 100, 1000 회 반복 가압시의 주응력을 가시화 하였으며, 최종 상대밀도 값은 0.7935, 0.8252, 0.8469 이었다. Table 2 는 완전계승계획법에 의해 총 27 회 해석하여 얻은 반응값이다.

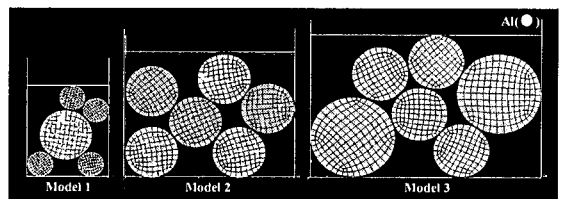


Fig. 1. FE mesh of rod array model for powder compaction simulation.

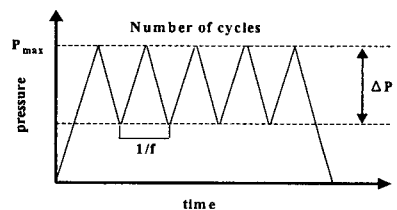


Fig. 2. Schematic diagram of the cyclic pressure.

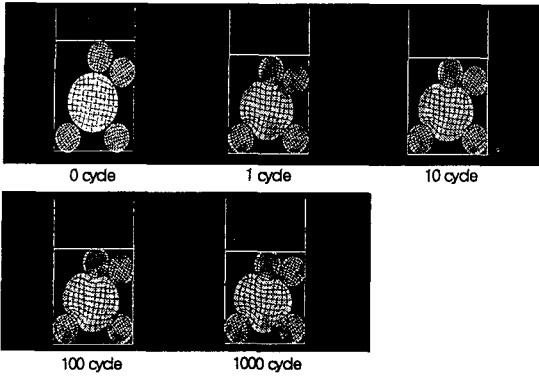


Fig. 3. Formed shape and Principal stress obtained from process simulation no. 1.

Table 2 Three-way factorial design and experimental result.

Simulation No.	Natural variables			Coded variables			Response
	ζ_1	ζ_2	ζ_3	x_1	x_2	x_3	y
1	7.5	125	0.1	-1	-1	-1	0.2397
2	7.5	125	0.3	-1	-1	0	0.2389
3	7.5	125	0.5	-1	-1	1	0.2315
4	7.5	100	0.1	-1	0	-1	0.3121
5	7.5	100	0.3	-1	0	0	0.3108
6	7.5	100	0.5	-1	0	1	0.3027
7	7.5	75	0.1	-1	1	-1	0.384
8	7.5	75	0.3	-1	1	0	0.383
9	7.5	75	0.5	-1	1	1	0.3743
10	15	125	0.1	0	-1	-1	0.1642
11	15	125	0.3	0	-1	0	0.164
12	15	125	0.5	0	-1	1	0.1572
13	15	100	0.1	0	0	-1	0.2189
14	15	100	0.3	0	0	0	0.2181
15	15	100	0.5	0	0	1	0.211
16	15	75	0.1	0	1	-1	0.2739
17	15	75	0.3	0	1	0	0.2725
18	15	75	0.5	0	1	1	0.2645
19	22.5	125	0.1	1	-1	-1	0.1664
20	22.5	125	0.3	1	-1	0	0.1668
21	22.5	125	0.5	1	-1	1	0.1606
22	22.5	100	0.1	1	0	-1	0.2032
23	22.5	100	0.3	1	0	0	0.2031
24	22.5	100	0.5	1	0	1	0.1962
25	22.5	75	0.1	1	1	-1	0.2405
26	22.5	75	0.3	1	1	0	0.2397
27	22.5	75	0.5	1	1	1	0.2323

2.5. 반응표면 모델

반응 표면 모델로서 이차 다항식 모델을 가정

하였다. 최소제곱법(method of least squares)에 의해 결정된 2차 회귀 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 0.218137 - 0.053844 x_1 + 0.054244 x_2 \\ & - 0.004089 x_3 - 0.017792 x_1 x_2 - 0.000608 x_1 x_3 \\ & - 0.000608 x_2 x_3 + 0.038789 x_1^2 + 0.000156 x_2^2 \\ & - 0.003311 x_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)

의 근사식에 대한 타당성을 판단하기 위하여 F-test를 수행하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 분산 분석에서 F_0 는 회귀의 평균제곱합(sum of residual mean square)을 잔차의 평균제곱합과의 비율로 나타낸 지수로써, 이 비율이 크면 회귀에 대한 평균제곱합이 잔차의 평균제곱합보다 커서 입력과 출력과의 관계를 설명하는데 유의하다는 의미를 가진다. F 분포표를 이용하여 주어진 유의수준과 자유도에 따라 기각치(F)를 구하여 $F_0 > F$ 이면 회귀식이 유의하다고 할 수 있다.

2.6. 최적 조건

본 연구의 3절계인자에 대한 최적화 문제는 식(6)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \bar{y} = f(x_1, x_2, x_3) \\ \text{subject to} \quad & -1 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

정의된 목적함수의 최대값을 찾기 위하여 격자 탐색법(Grid-search method)을 사용하였다. 격자 탐색법을 사용하여 구한 최적 조건을 Table 4에 수록하였다. 분석결과를 토대로 인자별 최적화를 위한 반응표면과 등고선 결과를 앞 식에 의해 구해보면 Fig. 4를 통해 Al_2O_3 입자 크기와 반복 가압 진폭의 크기가 작아질수록 상대밀도 변화량이 증가함을 알 수 있다. Fig. 5를 통해 Al_2O_3 입자 크기가 작아질수록 상대밀도 변화량이 크게 증가하지만, 마찰계수가 작아짐에 따라 나타나는 상대밀도 변화량은 진폭 크기 만큼 민감하지 않음을 등고선을 통해 알 수 있다. Fig. 6을 통해서 반복 가압 진폭이 작아질수록 상대밀도의 변화량의 증가함과 마찰계수가 감소함에 따라 상대밀도 변화량이 보다 덜 증가함을 알 수 있다. 반응표면으로부터 Al_2O_3 입자의 크기와 반복 가압 진폭의 크기에 비해 마찰계수가 미치는 영향이 적음을 알 수 있다.

Table 3 Analysis of variance for the regression model.

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean squares	F ₀
Regression	9	0.118352	0.01315	2044353.8
Error	17	1.09E-07	6.43E-09	
Total	26	0.118352		

Table 4 Optimized functional parameters.

Factor	Coded values		Natural values	
	x1	-1	ζ1	22.5μm
Al ₂ O ₃ particle size	x1	-1	ζ1	22.5μm
Amplitude of cyclic compaction	x2	1	ζ2	75MPa
Coefficient of friction	x3	-0.9485	ζ3	0.1103
Relative density	y	0.3850		0.9390

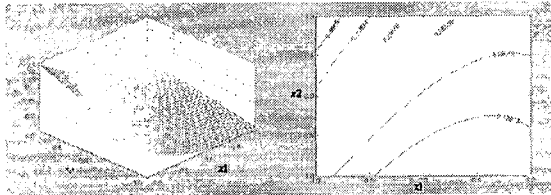


Fig. 4. Response surface model and contour map for x1 and x2.

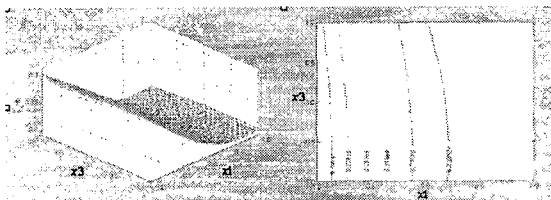


Fig. 5. Response surface model and contour map for x1 and x3.

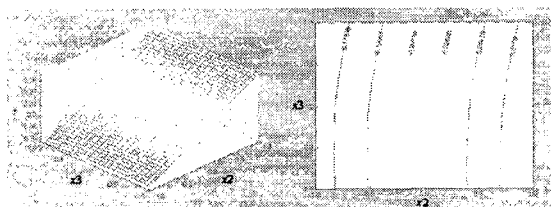


Fig. 6. Response surface model and contour map for x2 and x3.

3. 결론

본 연구는 quasi-random multi-particle array를 도입하여 유한요소법으로 가압 성형 공정을 시뮬레이션하고, 공정에 영향을 주는 파라미터들에 대한 최적화를 수행하며 다음의 결론을 얻었다.

1) Al₂O₃ 입자의 크기가 작아짐에 따라, 최대 압력을 고정한 상태에서 반복 가압 진폭이 적어짐에 따라, 그리고 마찰계수가 작아짐에 따라 상대밀도가 커지는 경향을 알 수 있었다.

2) 입자의 크기, 반복가압 진폭크기, 그리고 마찰계수와 출력 변수인 상대밀도 변화량과의 관계를 나타내는 회귀모델로부터 공정의 상대밀도 변화량을 예측 가능하게 하였으며, 고밀도 향상을 위한 공정 파라미터 최적 조건을 구하였다.

후 기

본 연구는 한양대학교 세라믹공정연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] S.C. Jung, Y.T. Keum "Design of Ceramics Powder Compaction Process Parameters (Part I : Finite Element Analysis)", Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, Submitted.
- [2] Box, G. E. P. and Wilson, K. B., "On the Experimental Attainment of Optimum Condition", Journal of the Royal Statistical Society, Series B., Vol. 13 (1951) p.1.
- [3] W. J. Roux, N. Stander, R. T. Haftka, "Response surface approximations for structural optimization", Int. J. Number. Meth. Engng., Vol. 42 (1998) p.517.
- [4] G. Venter, R. T. Haftka, 1998, "Construction of response surface approximations for design optimization", AIAA Journal, Vol. 36, No. 12 (1998) p.2242.
- [5] S. H. Park, Modern Method of Experiment, Minyoung Ltd, (1991)
- [6] S. Turenne, P. E. Mongeon, "Comparison of the Properties of Aluminum Matrix Composites Produced by Compaction and Powder Injection Molding", Advances in powder metallurgy & particulate materials (1995)