

파우더 블라스팅에 의한 유리가공시 실험계획법에 의한 재료 제거량 및 표면 거칠기 예측모델에 관한 연구

김권흠*, 성은제⁺, 한진용⁺, 박동삼⁺⁺, 유우식⁺⁺⁺

(논문접수일 2005. 11. 10, 심사완료일 2006. 2. 2)

A Study on the Predictive Modeling of Material Removal and Surface Roughness in Powder Blasting of Glass by Design of Experiments

Jin quan-qia*, Eun Je Seong⁺, Jin Yong Han⁺, Dong Sam Park⁺⁺, Woo Sik Yoo⁺⁺⁺

Abstract

The old technique of sandblasting which has been used for paint or scale removing, deburring and glass decorating has recently been developed into a powder blasting technique for brittle materials, capable of producing micro structures larger than 100 μ m. In this paper, we studied on the predictive modeling of material removal and surface roughness in powder blasting of glass by design of experiments. The surface characteristics and surface shape of powder blasted glass surface were tested under different blasting parameter. Finally, we proposed a predictive model for powder blasting process, and compared with experimental results.

Key Words : Powder Blasting(파우더 블라스팅), Material Removal(재료제거량), Surface roughness(표면 거칠기), Design of Experiments(실험계획법)

1. 서론

파우더 블라스팅(powder blasting)은 고압의 공기에 의하여 가속된 100 μ m 이하의 미세 분사재를 노즐로부터 고속으

로 분사하여 분사재의 충격력에 의하여 재료를 가공하는 기계적 에칭 가공법으로 미세가공(micromachining)의 한 기법으로 최근 그 용도가 크게 증가하고 있다.

특히, 최근 평판 디스플레이어의 급격한 발전에 따라 수십

* 인천대학교 산업공학과 대학원
+ 인천대학교 기계공학과 대학원
++ 교신저자, 인천대학교 기계공학과 (dspark@incheon.ac.kr)
주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177번지
+++ 인천대학교 산업공학과

혹은 수백 마이크로미터 단위의 구조물 성형을 위한 고정밀도의 기계적 에칭기법이 연구되고 있는데 파우더 블라스팅 기법이 아주 효율적 방법으로 인식되기 시작하여 연구 또한 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻⁵⁾.

본 연구에서는 파우더 블라스팅을 이용하여 유리의 가공시 가공조건이 표면 거칠기와 재료제거율에 미치는 영향을 규명하고, 실험계획법을 이용하여 표면 거칠기와 재료 제거량의 수학적 모델을 개발하여 실험 데이터와의 비교를 통하여 그 유효성을 평가함으로써 최적의 블라스팅 가공 파라메타를 선정하는데 기여하고자 한다.

2. 실험계획법

실험계획법(design of experiments)이란 현재 가지고 있는 정보를 최대한 이용하여, 최소의 비용으로 최대의 정보를 얻기 위하여 어떤 실험을 실시하면 좋은가를 고유기술과 수리통계학을 이용하여 계획하고 실행하여 결과 분석으로 결론을 얻는 방법이다.

실험계획법에는 여러 가지 방법이 있다. 그중에서 여러 개의 설명변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 방법을 반응표면분석법이라 한다. 반응표면 분석에 관한 연구는 1951년에 처음으로 Box와 Wilson⁽⁶⁾에 의하여 시작되어 최근에는 많은 연구자들에 의하여 활발히 진행되고 있다⁽⁷⁻¹¹⁾.

2.1 반응표면 분석의 모형

반응표면의 모형에서 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_n 와 종속변수 y 간의 미지 함수를 f 로 나타내면

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

가 된다. 반응함수로서 일반적으로 가정되는 간편하고 실용적인 반응표면모형은 n 개의 독립변수에 대한 중 회귀모형(multiple regression model)이다.

n 개의 독립변수를 가진 1차 2차 회귀모형은 아래와 같다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (3)$$

여기서, ε 는 오차로 $N(0, \sigma^2)$ 분포에 따른다고 가정한다.

2.2 최적반응 조건

위 식에서 n 개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬 표현식은 다음과 같다.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (4)$$

여기서,

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots \end{bmatrix},$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

최소제곱에 의해 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면 $S = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta)$ 가 되며 이를 β 로 미분하여 0으로 놓으면 β 의 최소 추정 값 $\hat{\beta}$ 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (6)$$

본 연구에서는 표면 거칠기와 재료 제거량의 모델을 개발하기 위하여 각각 2수준 3인자를 갖는 직교계획법으로 실험계획을 수립하였다. 반응표면의 추정식은 1차 회귀모형(first order regression model)을 사용하였다.

Table 1과 같이 본 계획법에서 각각의 변수에 대하여 인자의 수준을 “-1,+1”로 코딩하였다.

3. 실험장치 및 실험조건

본 실험에서 사용된 장비는 일본 신토(Sinto)에서 제작된

Table 1 Levels of independent variables

Levels	Low	High
Coding	-1	+1
Mass flow rate(g/min)	60	100
Pressure(MPa)	0.1	0.4
Feed(mm/s)	50	100

Micro Blaster(MB-1)이며 일반적인 샌드 블라스터와는 달리 정량공급 장치가 장착되어 일정량의 분사재를 공급하면서 정밀 미세가공이 가능한 장치이다. Fig. 1에는 Micro Blaster의 사진을, Fig. 2에는 이 장비를 이용한 파우더 블라스팅의 기본 가공원리를 나타내었다.

실험 시편은 일반적인 슬라이드 글래스로 Menzel사 제품

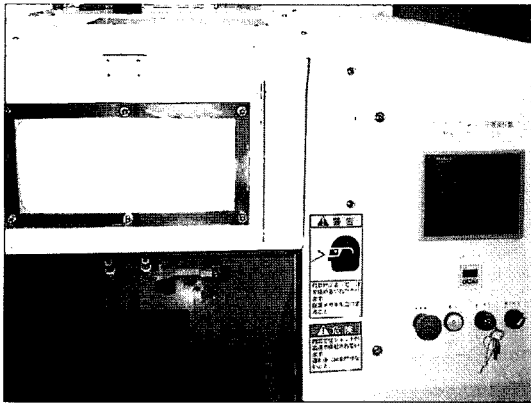


Fig. 1 Photograph of Micro Blaster

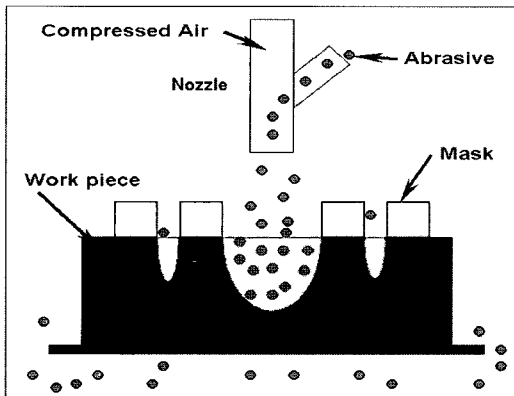


Fig. 2 Basic principle of powder blasting

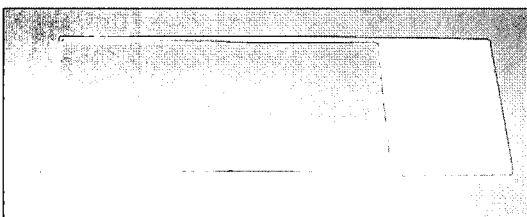


Fig. 3 Experimental sample

이며 규격은 ISO Norm 8037/1에 근거하여 제작된 시편을 사용하였으며 시편크기는 26mm×76mm×1.0mm이다. Fig. 3은 시편의 형상을 나타내는 사진이다.

실험에서 사용된 미립분사재는 알루미늄의 일종인 WA#600이다. 실험에서 분사재의 분사압력을 각각 0.1MPa, 0.25MPa, 0.4MPa, 분당 분사량을 60g, 100g, 노즐 이송속도를 50 mm/sec, 100mm/sec 및 150mm/sec로 변화시키면서 유리 표면을 분사가공 하였다.

시편은 각 조건에서 7장씩 가공하여 평균치를 산출하였다. 각 조건에서 형성된 표면을 미세형상측정기(Veeco NT1000)와 공구현미경(KT100 High Scope)을 이용하여 표면형상을 관찰하고, 분사가공 전후의 시편에 대하여 0.01mg 정밀 천칭을 이용하여 무게를 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험결과 및 예측모델

Fig. 4는 실험조건 중의 하나인 분사압력을 0.4MPa, 분사량을 100g/min, 노즐 이송속도를 50mm/sec로 했을 때 시편의 가공 후 표면 상태를 나타낸 사례이다.

Table 2는 위에서 선정한 실험조건에 의하여 실험한 결과를 종합적으로 나타낸 것이다. 마이크로 파우더 블라스팅 가공에서 일반적으로 표면의 거칠기와 재료제거율은 시편재료의 특성과 분사재의 특성 외에 분사가공중의 가공변수와 밀접한 관계를 갖는다. 블라스팅 가공 중 표면거칠기와 재료 제거량은 분사가공의 독립변수와는 관계는 아래의 수식과 같이 표현될 수 있다⁽⁹⁾.

$$S = CQ^{0.1}P^{0.2}f^{0.3} \quad (7)$$

여기서 S는 블라스팅 가공표면의 특성(표면 거칠기 혹은

3-Dimensional Interactive Display · Date: 03/02/2005 Time: 19:41:25

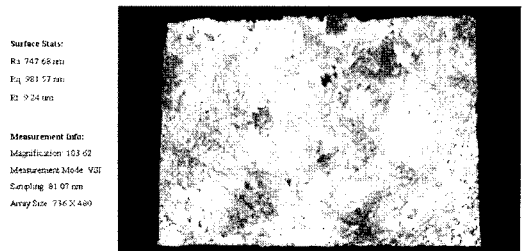


Fig. 4 Three dimensional display of machined surface

재료 제거량)을 나타낸다. Q, P, f 는 각각 분사량(g/min), 분사압력(MPa), 분사속도(mm/min)이고, C, a_1, a_2 및 a_3 는 상수이다.

이 방정식을 아래와 같은 모든 변수들을 대수로 표현한 선형조합의 형태로 표현할 수 있다.

$$\ln S = \ln C + a_1 \ln Q + a_2 \ln P + a_3 \ln f \quad (8)$$

위 식에 다중 선형 회귀 분석법을 적용하면 식 (9)와 같은 1차 회귀 모형을 얻을 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (9)$$

본 논문에서는 Table 1과 같이 인자의 수준을 (-1,1)로 하였다. 계산을 단순화하기 위하여 실제 변수들을 통계적으로 코딩화 하였으며 변환식은 아래와 같다.

$$x_1 = \frac{2\ln Q - \ln 100 - \ln 60}{\ln 100 - \ln 60} \quad (10)$$

$$x_2 = \frac{2\ln P - \ln 0.4 - \ln 0.1}{\ln 0.4 - \ln 0.1} \quad (11)$$

$$x_3 = \frac{2\ln f - \ln 150 - \ln 50}{\ln 150 - \ln 50} \quad (12)$$

위의 데이터를 이용하여 식 (6)에 대입하면 아래와 같은 1차 표면 거칠기 및 재료 제거량의 모델을 얻을 수 있다.

$$y_M = -3.5653 + 0.3118x_1 + 1.249x_2 - 0.4774x_3 \quad (13)$$

$$y_R = -0.0982 + 0.0066x_1 + 0.3024x_2 - 0.0356x_3 \quad (14)$$

재료 제거량 MR과 표면거칠기 Rf의 수학적 모델은 식

Table 2 Experimental conditions and results

Trial no.	mass flow rate (g/min)	Press. (MPa)	Feed (mm/sec)	Coding			M.R (g)	Ra (μm)
				x1	x2	x3		
1	60	0.1	50	-1	-1	-1	0.01	0.689
2	60	0.1	150	-1	-1	1	0.004	0.637
3	60	0.4	50	-1	1	-1	0.105	1.28
4	60	0.4	150	-1	1	1	0.046	1.17
5	100	0.1	50	1	-1	-1	0.018	0.695
6	100	0.1	150	1	-1	1	0.006	0.660
7	100	0.4	50	1	1	-1	0.24	1.27
8	100	0.4	150	1	1	1	0.086	1.19

(10), (11), (12)를 식 (13)과 (14)에 각각 대입하면 아래와 같이 결정된다.

$$MR = 0.1227 Q^{1.221} P^{1.802} f^{-0.8687} \quad (15)$$

$$Rf = 2.175 Q^{0.0258} P^{0.436} f^{-0.064} \quad (16)$$

위 식에서 나타낸 바와 같이 재료 제거량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 분사압력이고 표면 거칠기에서도 역시 분사압력이 큰 미향을 미치며 분사속도가 표면 거칠기에 미치는 영향은 아주 적다는 것을 알 수 있다.

4.2 분석 및 비교

Fig. 5와 Fig. 6은 분사량이 60g/min 일 때 분사압력이

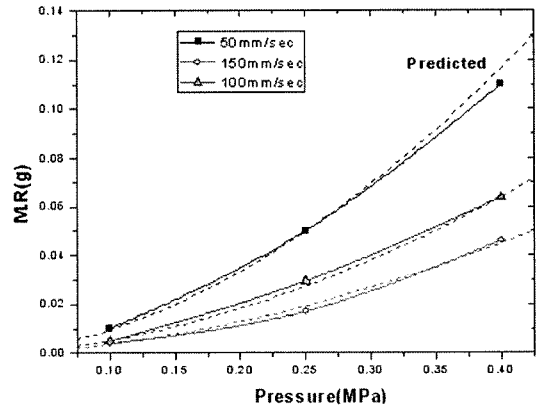


Fig. 5 Effect of pressure on material removal(mass flow rate : 60g/min)

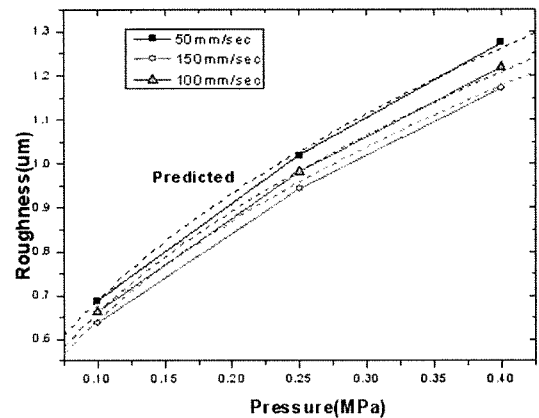


Fig. 6 Effect of pressure on surface roughness(mass flow rate : 60g/min)

Table 3 Predicted and measured value

Mass flow rate (g/min)	Press. (MPa)	Feed (mm/sec)	Material removal (g)		Surface roughness Ra (μm)	
			Measured	Predicted	Measured	Predicted
60	0.1	50	0.01	0.0096	0.689	0.688
60	0.1	100	0.005	0.0052	0.663	0.660
60	0.1	150	0.004	0.0037	0.637	0.641
60	0.25	50	0.05	0.0499	0.976	1.027
60	0.25	100	0.03	0.0274	0.961	0.983
60	0.25	150	0.017	0.0192	0.944	0.956
60	0.4	50	0.105	0.1166	1.28	1.261
60	0.4	100	0.05	0.0638	1.23	1.207
60	0.4	150	0.046	0.0449	1.17	1.174
100	0.1	50	0.018	0.0178	0.695	0.696
100	0.1	100	0.01	0.0097	0.674	0.666
100	0.1	150	0.006	0.0069	0.660	0.648
100	0.25	50	0.106	0.0932	0.95	1.030
100	0.25	100	0.062	0.0510	0.94	0.994
100	0.25	150	0.04	0.0359	0.94	0.967
100	0.4	50	0.24	0.2175	1.27	1.270
100	0.4	100	0.128	0.1191	1.23	1.220
100	0.4	150	0.086	0.0837	1.19	1.180

재료 제거량과 표면 거칠기에 미치는 영향을 도식적으로 나타낸 것이다. 실선은 실제 실험 결과이며, 점선은 본 문에서 제시한 모델을 이용하여 예측한 결과를 나타낸다.

Table 3은 실제 측정된 데이터와 본 논문에서 제시한 예측모델로 예측한 데이터를 나타낸다.

Fig. 5와 Fig. 6 및 Table 3으로부터 파워더 블라스팅 시 실제 재료 제거량과 표면 거칠기는 본 연구에서 제안된 예측 모델에 의한 예측치와 상당히 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 본 논문에서 예측한 모델로 분사속도와 분사압력 변화에 따른 재료 제거량과 표면 거칠기의 3차원 곡면 그래프를 나타낸다. Fig. 9와 Fig. 10은 3차원 그래프를 2차원 윤곽도로 나타낸 그림이다.

Fig. 11은 표면 거칠기와 재료 제거량을 분사속도와 분사압력을 변수로 하여 도식적으로 나타내기 위하여 Fig. 9에 Fig. 10을 추가한 2차원 윤곽도로 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 재료 제거량은 분사압력이 증가함에 따라 제거량이 증가하며 또한 분사압력이 증가함에 따라 분사속도가

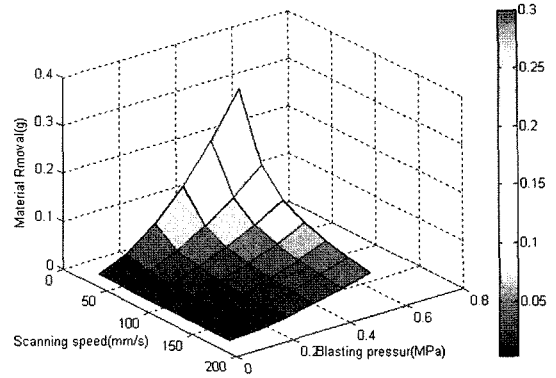


Fig. 7 3D surface plot of response model for material removal

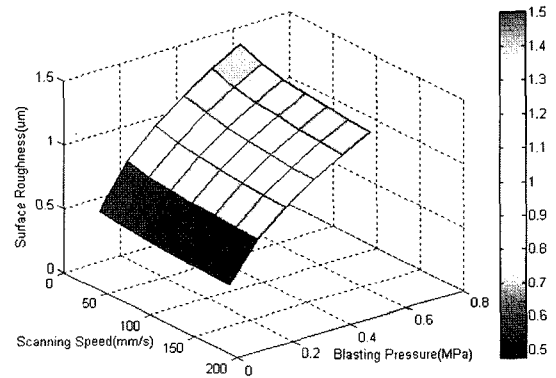


Fig. 8 3D surface plot of response model for surface roughness

재료 제거량에 미치는 영향도 어느 정도 커지는 것을 알 수 있다.

한편, 표면 거칠기는 Fig. 8과 같이 분사압력의 증가함에 따라 표면 거칠기가 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 분사압력이 0.1MPa 이하에서는 동일한 분사압력에서 분사속도가 증가하여도 표면 거칠기에 대한 영향이 미미한 것으로 나타나고 있다. 분사압력이 증가함에 따라 분사속도가 표면 거칠기에 미치는 영향도 커지는 것으로 나타나고 있다.

한편, Fig. 11의 a, b 두 점은 동일한 재료 제거량을 얻을 수 있는 분사속도와 분사압력을 나타내며 a, c 두 점은 동일한 표면 거칠기를 얻는 조건이다. 그림에서 a, c 두 점은 동일한 표면 거칠기에서 분사속도와 분사압력이 다르므로 재료 제거량도 다르다. 그래프를 통하여 분석한 결과 분사공에서 파라미터를 a 점으로 선택할 경우 c 점에 비해 재료

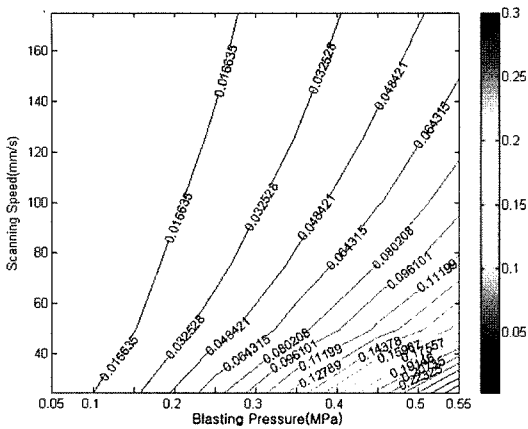


Fig. 9 Contour plot of material removal

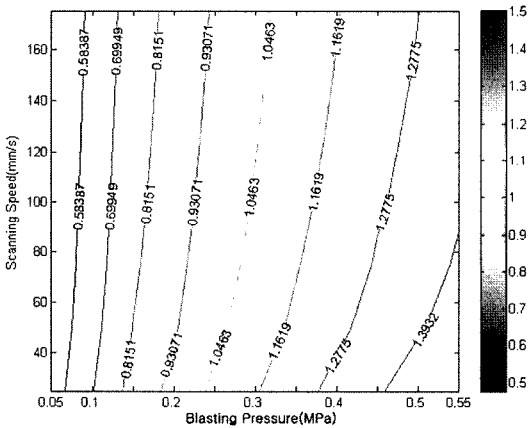


Fig. 10 Contour plot of surface roughness

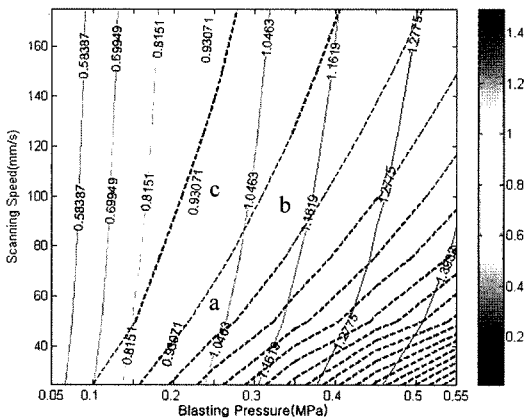


Fig. 11 Contour plot of material removal combined with surface roughness

제거량이 약 33% 상승하는 것으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서 개발한 예측모델에 의하여 생성된 2차원 윤곽도를 이용하여 실제 분사가공 시 적절한 파라미터를 선정한다면 제품의 형상정밀도를 만족하는 동시에 재료 제거량을 증가시켜 생산효율을 높일 수 있는 최적의 파라미터 선정이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 파우더 블라스팅 기법으로 유리의 가공 시 블라스팅 공정변수가 재료 제거량과 가공표면 거칠기에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고, 실험계획법의 일종인 반응표면 분석법으로 회귀분석과 직교배열법을 이용하여 표면 거칠기와 재료 제거율의 예측모델을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시편표면의 제거량은 전반적으로 노즐 이송속도에 반비례하며 분사압력에 비례하는데, 이송속도보다는 분사압력이 더욱 큰 영향을 미친다.
- (2) 표면 거칠기는 노즐 이송속도에는 거의 영향을 받지 않으나 분사압력에는 큰 영향을 받는다.
- (3) 반응표면 분석법을 이용하여 개발한 표면형상 예측모델을 이용하여 예측결과와 실제 측정결과를 비교한 결과 예측결과가 실제 측정결과와 매우 잘 일치하며, 분산분석에 의한 모델의 결정계수 R^2 은 표면 거칠기가 0.98, 재료 제거량은 0.85로 상당히 높은 유의성을 나타낸다.
- (4) 본 예측모델을 이용한 3차원 곡면 그래프와 2차원 윤곽도를 통하여 동일한 표면 거칠기에서 생산성을 높일 수 있는 최적의 가공 파라미터를 선정할 수 있으므로 실제 분사가공 시 표면특성의 예측이 가능하며 산업현장에서의 활용이 충분히 가능하다.

참고 문헌

- (1) Marshall, D. B., Lawn, B. R. and Evans, A. G., 1982, "Elastic/Plastic indentation damage in ceramics: the lateral crack system," *J. Am. Ceram. Soc.* 65, pp. 561~566.
- (2) Slikkerveer, P. J., Bouten, P. C. P. and de Haas, F. C. M., 2000, "High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting," *Sensors and Actuators* 85, pp. 296~303.

- (3) Wensink, H., Berenschot, J. W., Jansen, H. V. and Elwenspoek, M. C., 2000, "High Resolution Powder Blast Micromachining," *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 769~774.
- (4) Lighthart, H. J., Slikkerveer, P. J., In't Veld, F. H., Swinkels, P. H. W. and Zonneveld, M. H., 1996, "Glass and Glass Machining in Zeus Panels," *Philips J. Res.*, Vol. 50, No.3/4, pp. 475~499.
- (5) Cho, M. W., Cho, W. S., Park, D. S., Lee, J. H., Lee, E. S., Seo, T. I. and Kim, D. W., 2005, "Application of Powder Blasting Techniques to Micro-Pattern Making Process for Si₃N₄-hBN Composites," *Key Engineering Materials*, Vol. 287, pp. 51~56.
- (6) Box, G. E. P. and Wilson, K. B., 1951, "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions", *Journal of Royal Statistical Society*, Series B13, pp. 1~45.
- (7) Jain, R. K. and Jain, V. K., 2000, "Optimum Selection of Machining Conditions in Abrasive Flow Machining using Neural Network," *J. Mat. Pro. Tec.*, Vol. 108, pp. 62~67.
- (8) Dabnum, M. A. and JHashmi, M. S., 2005, "Surface Roughness Prediction Model by Design of Experiments for Turning Machinable Glass- ceramics," *J. Mat. Pro. Tech.*, 164-165, pp. 1289~1293.
- (9) Jain, V. K. and Adsul, S. G., 2000, "Experimental Investigation into Abrasive Flow Machining," *Int. J. Machine Tool & Manufacture*, Vol. 40, pp. 1003~1021.
- (10) Jain, R. K., Jain, V. K. and Kalra, P. K., 1999, "Modelling of Abrasive Flow Machining Process : A Neural Network Approach," *Wear*, Vol. 231, pp. 242~248.
- (11) Park, S. H., 2003, *Modern Design of Experiments*, Minyongsa.