

## 파우더 블라스팅을 이용한 유리 가공시 실험계획법에 의한 가공면 분석

김권흡\*(인천대 대학원 산업공학과), 김정근, 한진용, 성은제(인천대 대학원 기계공학과)  
박동삼(인천대 기계공학과), 유우식(인천대 산업공학과)

### Predictive modeling of surface roughness and material removal in powder blasting of glass by design of experiments

Quan-Qia Jin(Industrial Eng., Univ. of Incheon), J.K. Kim, J.Y. Han, E.J. Seong(Mech. Eng., Univ. of Incheon),  
Dong Sam Park(Mech. Eng. Univ. of Incheon), W. S. Yoo(Industrial Eng. Univ. of Incheon)

#### 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 100um. A large number of investigations on the abrasive jet machining with output parameters as material removal rate, penetrate and surface finish have been carried out and reported by various authors. In this paper, we investigated the effect of surface characteristics and surface shape of the abrasive jet machined glass surface under different blasting parameter. and finally we established a model for abrasive flow machining process, and compared with experimental results.

Key Words : Powder Blasting(파우더 블라스팅), Glass(유리), Material Removal(재료제거량),  
Surface roughness(표면거칠기), Design of Experiments(실험계획법)

#### 1. 서론

파우더 블라스팅은 고압의 가스에 의하여 가속된 100um 이하의 미소 분사재를 노즐로부터 고속으로 분사하여 분사재의 충격력에 의하여 재료를 가공하는 방법이다. 최근 평판 디스플레이어의 급격한 발전에 따라 수십 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<sup>1-10)</sup>.

본 연구에서는 파우더 블라스팅을 이용하여 유리의 가공 시 가공조건이 표면거칠기와 재료제거율에 미치는 영향을 규명하고, 실험계획법을 이용하여 표면거칠기와 재료제거율의 수학적 모델을 개발하여 실험데이터와 비교를 통하여 그 유효성을 평가한다.

#### 2. 파우더 블라스팅의 가공기구

파우더 블라스팅의 가공기구는 기본적으로 Marshall이 제안한 압입이론(indentation theory)을 이용하여, 파우더 블라스팅 시 고체 미립자에 의한 공작물체의 충격과 경도시험시의 압입사이의 유사성에 기초한 해석모델을 제시하였다. 비교적 최근에 제안된 Slikkerye<sup>1)</sup>의 모델에 의하면, Fig. 1과 같이 날카로운 인덴터 팁의 압입 시 팁 아래 부분에서 압축응력에 의하여 소성변형영역이 형성되는데 하중이 증가할수록 소성영역도 증가하여 결국에는 표면과 수직인 방향으로의 반경/중앙 크랙과 수평방향으로의 측면 크랙이 형성된다. 측면 크랙은 표면의 제거에 직접적인 역할을 하지만 반경/중앙 크랙은 결함 발생과 연관성을 갖는 것으로 가공깊이가 깊어질 경우 가공을 촉진하는 역할도 한다.

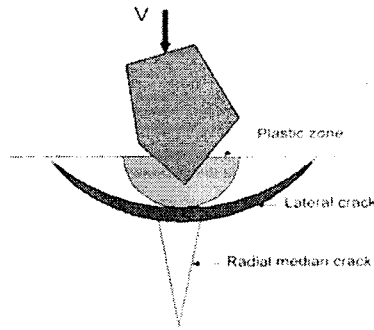


Fig. 1 The micro cracks in indentation process

소재의 제거 즉 가공과 관련된 측면 크랙의 길이  $l_c$ 와 깊이  $d_c$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$l_c \propto \frac{E^{3/8} H^{1/8} \Delta V^{5/12}}{K_c^{1/2}} \quad (1)$$

$$d_c \propto \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \Delta V^{1/3} \quad (2)$$

입자의 충돌 동안 모든 운동에너지가 소성변형으로 흡수된다고 가정할 수 있는데 이는 아주 높은 하중상태 아래서는 탄성변형이나 크랙 생성에 소요되는 에너지는 소성변형에 필요한 에너지에 비하여 5% 이하로 아주 작기 때문이다. 경도  $H$ 가 압입 깊이 전 구간을 통하여 일정하다고 가정하고 충돌에 따른 운동에너지를 소성변형에 필요한 에너지와 같다고 두면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int_0^{\delta} p(\delta')d\delta' = H\Delta V \quad (3)$$

한편, 미립분사재의 단위 무게당 제거되는 소재 무게의 비로서 정의되는 가공율(erosion rate)  $Q$ 는 각각의 분사재 입자가 측면크랙의 깊이  $d_c$ 와 측면크랙 자체의 표면적에 비례하여 소재의 각 입자들을 제거한다고 가정할 때 식(1)과 식(2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q \propto \pi l_c^2 d_c \propto \frac{\rho' E^{5/4}}{H^{17/12} K_c} \rho_p^{1/6} r_p^{1/2} v_p^{7/3} \quad (4)$$

식 (4)로부터 가공율은 두 개의 파라미터 군으로 구성된다는 것을 알 수 있는데 앞부분은 가공하고자 하는 소재에, 뒷부분은 가공공정 변수들에 영향을 받는 요소가 된다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 실험에서 사용된 장비로는 일본에서 제작된 블라스트 가공기(Micro Blaster : MB-1)을 사용하였으며 일반적인 샌드 블라스터와는 달리 정량공급 장치가 장착되어 있어 일정량의 분사재를 공급할 수 있도록 되어있는 장비이다.

#### 3.2 시편 및 실험조건

본 실험에서 일반적인 SLIDE GLASS로 Menzel사 제품이며 규격은 8037/1에 근거하여 제작된 시편을 사용하였다. 시편크기는 1.0mmx26mmx76mm이다.

실험에서 사용된 미립분사재는 알루미늄의 일종인 WA#600이다. 실험에서 분사재의 분사압력을 각각 0.1MPa, 0.25MPa, 0.4MPa, 분당 분사량을 60g, 100g, 노즐 이송속도를 50mm/sec, 100mm/sec, 및 150mm/sec로 변화시키면서 유리표면을 분사 가공하였다. 시편은 각 조건에서 7장씩 가공하여 평균치를 산출하였다.

각 조건에서 형성된 표면을 미세형상측정기 (Veeco NT1000)와 공구현미경(KT100 High Scope)을 이용하여 표면형상을 관찰하고, 분사가공 전후 무게를 0.01mg 정밀천칭을 이용하여 제거된 무게를 측정하였다.

Fig. 2는 시편의 형상을 나타낸다.

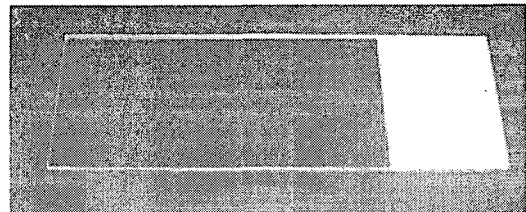


Fig. 2 Experimental sample

### 4. 실험계획법

실험계획법(design of experiment)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 Wilson에 의하여 시

작되어 최근에는 많은 연구자들에 의하여 활발히 진행되고 있다.

#### 4.1 반응표면의 모형

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

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

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.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (7)$$

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

#### 4.2 최적반응 조건

위식에서  $n$ 개의 관찰점을 동시에 나타내기 위한 행렬 표현 식은 다음과 같다.

$$y = X\beta + \varepsilon$$

여기서,

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

을 의미한다.

최소제곱에 의해 오차제곱의 합을 행렬을 사용하여 표현하면

$$S = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta)$$

가 되며 이를  $\beta$ 로 미분하여 0으로 놓으면  $\beta$ 의 최소 추정 값  $\hat{\beta}$ 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \quad (9)$$

$\hat{\beta}$ 는  $\beta$ 의 최소제곱 값의 벡터를 의미한다.

## 5. 실험결과 및 분석

### 5.1 실험결과 및 예측모델

Table 1은 위에서 선정된 실험조건에 의하여 실험한 결과를 나타낸다.

Table 1. Experimental conditions and results

Trial no.	mass flow rate (g/min)	Press. (MPa)	Feed (mm/sec)	Coding			Material removal (g)	Surface roughness Ra (um)
				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	0.1	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

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 독립변수와 관계는 아래의 수식과 같이 표현될 수 있다.

$$S = CQ^{a1} P^{a2} f^{a3} \quad (10)$$

여기서  $S$ 는 블라스팅 가공표면의 특성(표면거칠기 혹은 재료제거량)을 나타낸다.  $Q, P, f$ 는 각각 분사량(g/min), 분사압력(MPa), 분사속도(mm/min)이고,  $C, a1, a2$  및  $a3$ 는 상수이다.

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

$$\ln S = \ln C + a1 \ln Q + a2 \ln P + a3 \ln f \quad (11)$$

위식을 다중 선형 회귀 분석법을 적용하면 위식 (6)와 같은 1차 회귀 모형을 얻을 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (12)$$

본 논문에서는 Table 1과 같이 인자의 수준을 (-1,1)로 하였다.

본 논문에서 계산을 단순화하기 위하여 실제 변수들을 통계적 코딩화 하였다. 이 변환 식은 아래와 같다.

$$x_1 = \frac{2\ln P - \ln 100 - \ln 60}{\ln 100 - \ln 60} \quad (13)$$

$$x_2 = \frac{2\ln q - \ln 0.4 - \ln 0.1}{\ln 0.1 - \ln 0.4} \quad (14)$$

$$x_3 = \frac{2\ln q - \ln 150 - \ln 50}{\ln 150 - \ln 50} \quad (15)$$

위의 데이터를 이용하여 식 (9)에 대입하면 아래와 같은 1차 표면거칠기 및 재료 제거량의 모델을 얻을 수 있다.

$$y_M = -2.098 + 1.2208x_1 + 1.802x_2 - 0.8687x_3 \quad (16)$$

$$y_R = -0.0982 + 0.0066x_1 + 0.3024x_2 - 0.0356x_3 \quad (17)$$

재료 제거율 MR과 표면거칠기 Rf의 수학적 모델은 위의 식 (13), (14), (15)를 식 (16)과 (17)에 각각 대입하면 아래와 같이 결정된다.

$$MR = 0.1227Q^{1.221}P^{1.802}f^{-0.8687} \quad (18)$$

$$Rf = 2.175Q^{0.0258}P^{0.436}f^{-0.064} \quad (19)$$

## 5.2 분석 및 비교

위 식에서 나타낸 바와 같이 재료 제거량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 분사압력이고 표면거칠기에 서도 역시 분사압력이 큰 미향을 미치며 분사속도가 표면거칠기에 미치는 영향은 아주 적다.

Fig. 3과 Fig. 4는 분사량이 60g/min 일 때 분사압력이 재료거량과 표면거칠기에 미치는 영향을 도식적으로 나타낸 것이다.

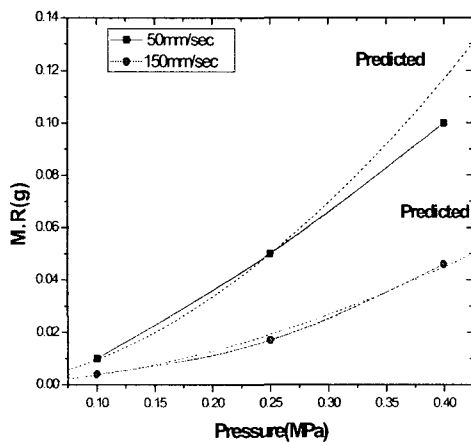


Fig. 3 Effect of pressure on material removal (mass flow rate:60g/min)

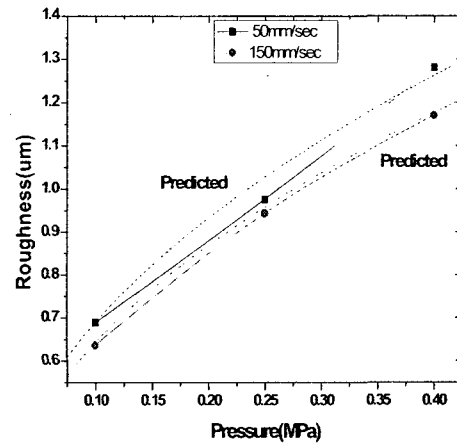


Fig. 4 Effect of pressure on surface roughness (mass flow rate:60g/min)

Table.2는 실제 측정된 데이터와 본 논문에서 제시한 예측모델로 예측한 데이터를 나타내고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3 및 Table 2로부터 파우더 블라스팅 시 실제 재료 제거량과 표면거칠기는 본 연구에서 제안된 예측모델에 의한 예측치와 거의 일치하고 있다는 것을 알 수 있는데 이는 예측모델의 정확성을 검증하는 동시에 생산현장에서도 충분히 활용될 수 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

Table 2 Predicted and measured material removal

Mass flow rate (g/min)	Press. (MPa)	Feed (mm/sec)	Material removal (g)		Surface roughness Ra (um)	
			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	0.1	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

#### 4. 결론

본 연구에서는 파우더 블라스팅 기법으로 유리의 가공 시 블라스팅 공정변수가 재료 제거량과 가공표면거칠기에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고 실험계획법의 일종인 반응표면 분석법을 이용하여 표면거칠기와 재료 제거율의 예측모델을 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시편표면의 제거량은 전반적으로 노즐 이송속도에 반비례하며 분사압력에 비례하는데, 이송속도보다는 분사압력이 더욱 큰 영향을 미친다.

2. 표면거칠기는 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 일치하였다.

4. 결과적으로 본 예측모델을 이용하여 실제가공에서의 표면특성의 예측이 가능하며 산업현장에서 최적의 가공조건을 선정할 수 있으므로 산업현장에서의 활용이 충분히 가능하다.

#### 참고문헌

1. P.J. Slikkerveer, P.C.P. bouten, F.C.M. de Haas, "High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting," Sensors and Actuators 85, pp. 296-303, 2000.
2. Henk Wensink, U.W. Berenshot, henri V. Jan seu, Miko C. elwenspoek, "High Resolution Powder Blast Micromachining," Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems 2000, pp. 769-774, 2000.
3. H. J. Lighthart, P. J. Slikkerveer, F.H. In't Verd, "Glass and Glass Machining in Zeus Panels", Philips J. Res., Vol. 50, No.3/4, pp.475-499, 1996
4. M. A. Dabnum, M. S. J Hashmi, "Surface Roughness Prediction Model by Design of Experiments for Turning Machinable Glass-ceramics", J. Mat. Pro. Tech., 164-165, pp. 1289-1293, 2005
5. V.K Jain, S.G.Adsul, "Experimental Investigation into Abrasive Flow Machining", Int. J. Machine Tool & Manufacture, Vol.40, pp.1003-1021, 2000
6. R. K. Jain, V. K. Jain, P. K. Kalra, "Modelling of Abrasive Flow Machining Process: A Neural Network

Approach", Wear Vol.231, pp.242-248, 1999

7. M.W. Cho, W.S. Cho, D.S. Park, J.H. Lee, E.S. Lee, T.I. Seo, D.W. Kim, "Application of Powder Blasting Techniques to Micro-Pattern Making Process for Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-hBN Composites", Key Engineering Materials Vol. 287, pp. 51-56, 2005/3.
8. 박동삼, 서태일, "유리의 경사미립분사가공 시 가공성", 한국정밀공학회 논문집, 제21권, 제6호, pp. 28-34, 2004/6.
9. 박동삼, 강대규, 김정근, "파우더 블라스팅을 이용한 도광판 금형의 매트처리", 한국기계가공학회 2004년도 추계학술대회논문집, pp. 100-1004, 2004/11/13.