

## 반응표면모델(RSM)에 의한 평면연삭조건 최적화 및 평가

김상오\*(부경대원), 곽재섭, 구양, 심성보, 정영득, 하만경(부경대)

Analysis and Optimization of Grinding Condition by Response Surface Model

S. O. Kim(Graduate, PKNU), J. S. Kwak, Y. Koo, S. B. Sim, Y. D. Jeong and M. K. Ha(PKNU)

### ABSTRACT

Grinding process has unique characteristics compared with other machining processes. The cutting edges of the grinding wheel don't have uniformity and act differently on the workpiece at each grinding. The response surface analysis is one of various methods for optimizing and evaluating the process parameters to achieve the desired output. In this study, the effect of the grinding parameters on outcomes of the surface grinding was analyzed experimentally. To predict the grinding outcomes and to select the grinding conditions before grinding, the second-order response surface models for the grinding force and the surface roughness were developed.

**Key Words :** Optimization (최적화), Grinding condition (연삭조건), Surface roughness (표면거칠기), Response surface model (반응표면모델)

### 1. 서론

초경합금 등 고경도에서부터 고무와 같은 연질재료에 이르기까지 기계 및 부품류의 가공공정에서 연삭가공법은 다른 절삭가공법과 비교하여, 고속에서 매우 적은 양의 절입깊이로 가공하기 때문에 형상 및 치수정밀도가 높고, 표면품위와 표면거칠기가 우수한 제품을 얻을 수 있는 가공법으로 다양한 산업분야에서 응용되고 있는 중요한 공정중의 하나이다. 그러나 동일한 조건에서도 재현성을 얻기 힘들고 다양한 공정변수가 제품의 결과에 영향을 미치기 때문에, 공정변수와 결과사이의 인과관계를 정확히 규명하기 어려운 문제점을 안고 있다.<sup>(1)</sup>

연삭가공뿐만 아니라 선삭, 밀링, 폴리싱공정에서 공정변수와 제품 결과와의 상관성을 규명하고 공정변수들을 최적화하는 다양한 연구들이 이루어져 왔다.<sup>(2-4)</sup> 특히, Kulkarni<sup>(5)</sup> 등은 선삭에서 반응표면 모델을 개발하여 표면거칠기 향상을 위해 공정변수의 최적화를 시도하였다. 또한 Gopal<sup>(6)</sup> 등은 실리콘 재료의 연삭에서 표면거칠기와 표면품위를 구속조건으로 하고, 금속재거량을 극대화하기 위한 반응표면 모델을 개발하여 그 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 금형강의 평면연삭 가공특성을 파

악하기 위하여 연삭숫자의 입도와 테이블의 이송속도 및 절입깊이 변화에 따른 연삭력과 표면거칠기를 측정하여 평가하고, 이를 실험결과로부터 연삭력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 반응표면 모델을 개발하여 그 유용성을 검증하고자 한다.

### 2. 반응표면 모델

반응표면 분석은 여러 개의 공정변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 공정결과에 영향을 미치고 있을 때, 이들 사이의 관계를 공학적인 의미를 갖는 반응표면으로 나타내고 반응표면에 대한 통계적인 분석을 통하여 각 공정변수의 영향정도와 최적의 공정결과를 얻을 수 있는 공정변수 값을 추출하는 방법을 말한다.

만약, 변수들의 흥미영역에서 변수와 반응특성 간에 어떤 함수관계가 있고 함수  $f$ 의 반응표면이 곡선으로 표현될 수 있다면, 다음과 같이 2차 반응표면 모델(Second-order response surface model)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Psi &= f(x_1, x_2, \dots, x_k) \\ &= \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j\end{aligned}\quad (1)$$

식 (1)에서  $\beta_i$ 는 반응표면 모델의 특성을 나타내고, 실험결과를 적용하여 구해야 하는 계수들이다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 평면연삭 솟돌은 알루미나계의 WA입자와 비트리파이드 결합재(Vitrified bond)를 채용하여, 결합도는 K이고 직경  $\phi 250\text{mm}$ , 폭  $15\text{mm}$ 의 치수를 갖는다. 공작물은 금형재료로 널리 사용되고 있는 금형강으로 길이  $100\text{mm}$ , 폭  $60\text{mm}$ , 높이  $20\text{mm}$ 로 하였다.

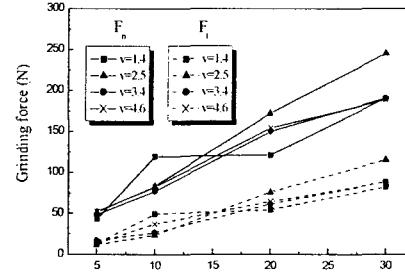
실험장치의 구성에 있어서, 평면연삭기(NAGASE SGH-6, Japan)에서 연삭가공시 발생되는 연삭력의 측정을 위해 압전형 공구동력계(Kistler, 9257B)를 연삭기 테이블에 설치하고 그 위에 공작물을 고정하였다. 연삭가공시 공구동력계에서 발생된 신호는 다채널 증폭기(Kistler, 5019B)에서 증폭 및 필터링된 후 A/D 변환기를 거쳐 개인용 컴퓨터에 저장되고, 데이터처리 소프트웨어를 사용하여 실험에서 얻어진 연삭력을 평가하였다. 또한 연삭된 공작물의 표면거칠기는 축침식 표면조도계로 측정하였다. 실험조건의 변경시마다 연삭속도들은 단석 다이아몬드 드레사로  $20 \sim 30\mu\text{m}$ 정도 드레싱을 실시하였고, 모든 연삭가공은 상향연삭으로 수용성 유제를 사용한 습식연삭을 실시하였다.

속돌의 원주속도는  $1800\text{rpm}$ 으로 일정하게 적용하였고, 입자의 크기는 #100, 220, 300으로 하였으며 절삭깊이는  $5, 10, 20, 30\mu\text{m}$ , 테이블의 이송속도를  $1.4, 2.5, 3.4, 4.6\text{m/min}$ 까지 단계별로 변화시키면서 실험하였다. 실험에서 매 1회 가공마다 연삭력과 표면거칠기를 측정하였으며, 스파크아웃의 횟수에 따른 연삭력과 표면거칠기를 평가하였다.

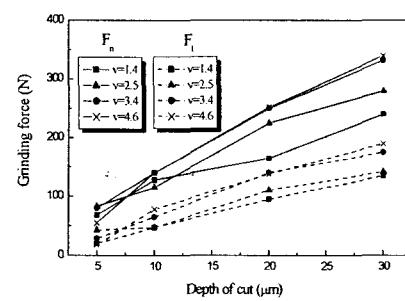
### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 연삭력의 변화 특성

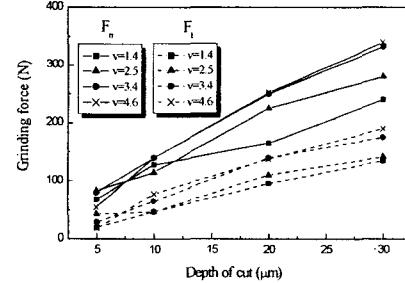
연삭조건 변화에 따른 정적연삭력의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 대부분의 연삭조건에서 접선연삭력 보다 법선연삭력이 대략 2~3배 정도로 크게 나타났고, 테이블 이송속도와 절입깊이의 증가에 비례하여 정적연삭력이 증가하였다. 또한 입도가 커질수록, 즉 입자의 크기가 작아질수록 연삭력은 증가하였다. 이러한 현상은 입도가 커질수록 단위면적당 절삭에 관여하는 입자의 수가 많아져서 각 입자당 작용하는 연삭력은 작아지나, 각 입자가 공작물을 파고들어 가는데 필요한 힘이 증가하고 또 솟돌에서 기공의 크기와 량이 작아져서 침이 쉽게 배출되지 못하여 절삭력의 상승을 가져오는 요인으로 작용하기 때문이다.



(a) WA #100



(b) WA #220

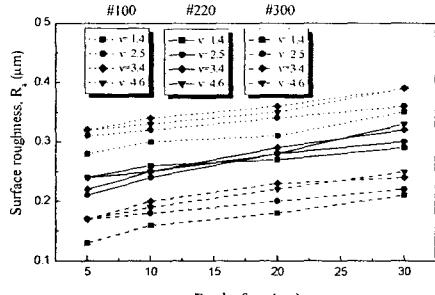


(c) WA #300

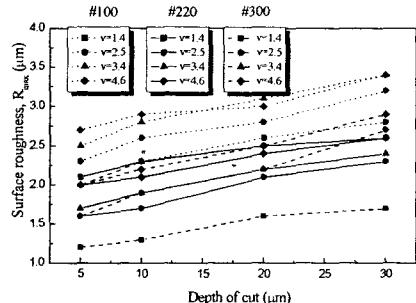
Fig. 1 Change of grinding force

#### 4.2 표면거칠기의 변화 특성

연삭조건 변화에 따른 공작물의 표면거칠기 변화를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2(a)에 나타낸 중심선 평균 표면거칠기의 변화를 살펴보면, 입도가 커질수록 또 절입깊이와 테이블의 이송속도가 낮아질수록 표면거칠기가 거의 선형적으로 향상됨을 알 수 있었다. 특히 연삭가공후에 얻을 수 있는 공작물의 중심선 평균 표면거칠기는 다른 어떤 연삭조건보다 입도에 따라서 명확히 구분되는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 2(b)의 최대높이 표면거칠기는 중심선 평균 표면거칠기와는 달리 입도에 따라 얻을 수 있는 거칠기 범위가 명확한 구분되지 않는 특징을 나타내었다. 이는 최대높이 표면거칠기가 중심선 평균 표면



(a)



(b)

Fig. 2 Change of surface roughness

거칠기와 같이 공작물의 평균화된 거칠기를 나타내는 것이 아니라, 공작물내에서 가장 좋지 못한 표면 거칠기를 대변하는 것으로 단순히 연삭조건 뿐만 아니라 공작물 자체의 문제 및 특정한 순간에서 발생할 수 있는 연삭가공계의 불안정성 등이 모두 관여하여 나타나기 때문에 일어나는 현상이다. 그러나 전반적으로 절입깊이와 테이블의 이송속도가 증가할 수록 최대높이 표면거칠기가 나빠지는 경향을 나타내었다.

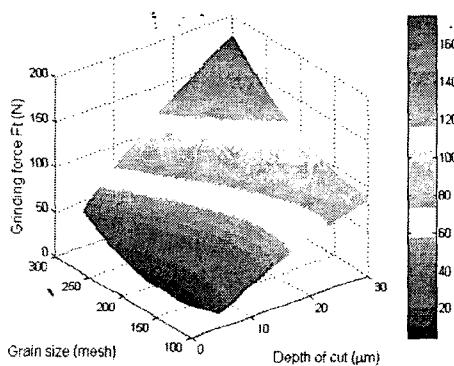
### 5. 반응표면 모델의 개발과 검증

실험결과들로부터 접선 및 법선연삭력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 2차 반응표면 모델을 개발하였다. 반응표면 모델 개발에서 연삭공정 변수는 절입깊이(*t*), 테이블 이송속도(*v*) 및 연삭숫자들의 입도(*m*)를 사용하였으며, 반응표면과 변수들의 관계는 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \psi = & f(t, v, m) \\ = & \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 v + \beta_3 m + \beta_{11} t^2 \\ & + \beta_{22} v^2 + \beta_{33} m^2 + \beta_{12} tv \\ & + \beta_{13} tm + \beta_{23} vm \end{aligned} \quad (2)$$

Table 1 Coefficients of response surface model

	$F_t$	$F_n$	$R_a$
$\beta_0$	75.0342	65.6230	0.269171
$\beta_1$	2.0254	1.6921	0.002307
$\beta_2$	-6.9189	4.1837	0.025372
$\beta_3$	-0.9360	-0.8433	-0.000056
$\beta_{11}$	-0.0564	-0.0638	-0.000015
$\beta_{22}$	0.7136	0.4538	-0.003096
$\beta_{33}$	0.0022	0.0027	-0.000001
$\beta_{12}$	0.2991	1.2038	0.000250
$\beta_{13}$	0.0133	0.0180	0.000001
$\beta_{23}$	0.0154	-0.0542	-0.000006



(a)

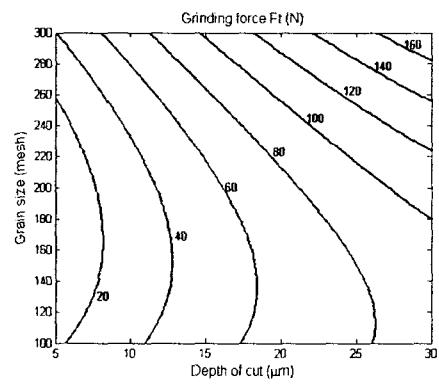


Fig. 3 An example of response surface model

개발된 반응표면 모델의 예측치와 실험을 통하여 구해진 연삭력과 표면거칠기의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 전체적으로 연삭력과 표면거칠기의 예측치와 실험치가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 개발된 2차 반응표면 모델은 연

## 6. 결 론

본 연구는 금형강의 평면연삭 가공특성을 평가하기 위한 실험 및 해석적 방법을 적용한 것이다.

연삭조건 변화에 따른 정적연삭력은 법선연삭력이 접선연삭력의 2~3배 정도로 크게 나타났다. 연삭조건 변화에 따른 연삭력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 2차 반응표면 모델을 개발하였다. 개발된 반응표면 모델의 예측치는 실험치와 잘 일치함으로 연삭가공 조건의 설정에 용이하게 활용될 수 있다.

## 참고문헌

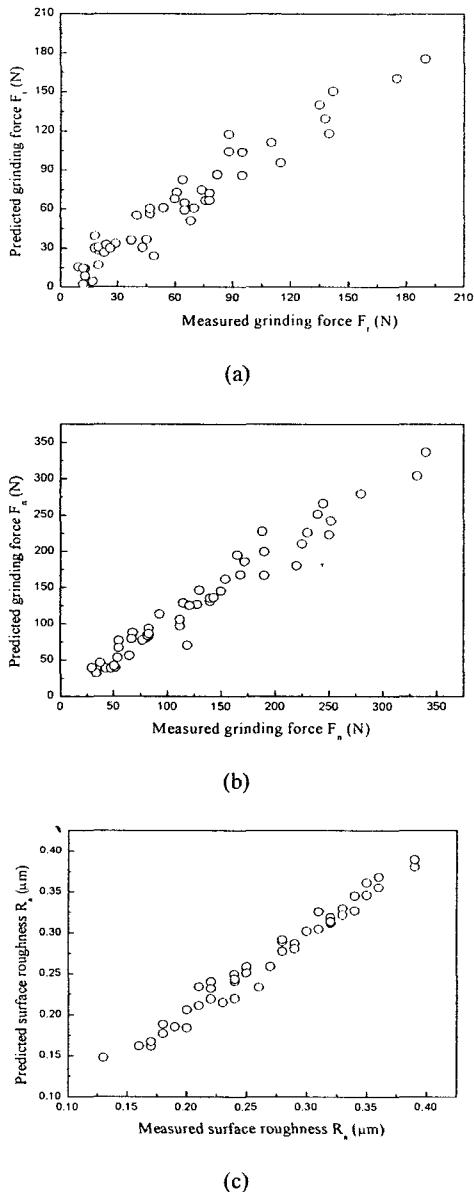


Fig. 4 Prediction by developed response surface model

삭력과 표면거칠기의 예측에 유효함을 알 수 있다. 이러한 반응표면 모델을 이용하면 본 연구에서 적용하지 않은 연삭조건에서도 연삭력과 표면거칠기를 예측하는 것이 가능해 진다.

1. Kwak, J.S. and Ha, M.K., "Detection of Dressing Time Using the Grinding Force Signal Based on the Discrete Wavelet Decomposition," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 23, No. 1-2, pp. 87~92, 2004.
2. Kopac, J., Bahor, M. and Sokovic, M., "Optimal Machining Parameters for Achieving the Desired Surface Roughness in Fine Turning of Cold Pre-formed Steel Workpieces," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, No. 6, pp. 707~716, 2002.
3. Lin, T.R., "Experimental Design and Performance Analysis of TiN-coated Carbide Tool in Face Milling Stainless Steel," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 127, No. 1, pp. 1~7, 2002.
4. Lin, T.R., "The Use of Reliability in the Taguchi Method for the Optimization of the Polishing Ceramic Gauge Block," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 22, No. 3-4, pp. 237~242, 2003.
5. Kulkarni, M.S. and Mariappan, V., "Multiple Response Optimization for Improved Machined Surface Quality," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, No. 2, pp. 174~180, 2003.
6. Gopal, A.V. and Rao, P.V., "Selection of Optimum Conditions for Maximum Material Removal Rate with Surface Finish and Damage as Constraints in SiC Grinding," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 13, pp. 1327~1336, 2003.