

〈 논문 〉

평면연삭에서 가공특성 평가 및 반응표면모델 개발

곽 재 섭*

(2004년 12월 29일 접수, 2005년 2월 17일 심사완료)

Grinding Characteristic Evaluation and Development of Response Surface Models in Surface Grinding Process

Jae-Seob Kwak

Key Words: Response Surface(반응표면), Contour Plot(윤곽선도), Surface Grinding(평면연삭), Grinding Force(연삭력), Surface Roughness(표면거칠기)

Abstract

This study aims to perform the characteristic evaluation of surface grinding for the STD11 material with experimental and analytic techniques based on the response surface model. The grinding force acting on the workpiece and the ground surface roughness were measured according to the change of grain size, table speed and depth of cut. The effect of spark-out on the grinding force and the surface roughness was also characterized. The frictional coefficient between workpiece and grinding wheel could be determined by the analysis of spark-out effect. From the experimental data, the second-order response surface models were developed to predict the grinding force and the surface roughness. Validation of the developed model was examined.

1. 서 론

현재 기계 및 부품의 생산에서는 목적과 용도에 따라 충분한 기능을 발휘할 수 있도록 하기 위해서 초경합금 등과 같은 고경도 재료에서부터 고무와 같은 연질재료까지 광범위하게 사용되고 있다. 이들 기계 및 부품 생산공정에서 연삭가공법은 다른 절삭가공법과 비교하여, 고속에서 매우 적은 양의 절입깊이로 가공하기 때문에 형상 및 치수정밀도가 높고, 표면품질과 표면거칠기 우수한 제품을 얻을 수 있는 가공법으로 다양한 산업분야에서 응용되고 있는 중요한 공정중의 하나이다. 그러나 동일한 조건에서도 재현성을 얻기 힘들고 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 다양한 공정변수가 제품의 결과에 영향을 미치기 때문에,

공정변수와 제품의 결과사이의 인과관계를 정확히 규명하기 어려운 문제점을 안고 있다.⁽¹⁻³⁾

연삭가공^(4,5)뿐만 아니라 선삭,⁽⁶⁾ 밀링,⁽⁷⁾ 폴리싱 공정⁽⁸⁾에서 공정변수와 제품 결과와의 상관성을 규명하고 공정변수들을 최적화하는 다양한 연구들이 이루어져 왔다. 특히, Kulkarni⁽⁹⁾ 등은 선삭에서 1차 반응표면 모델을 개발하여 표면거칠기 향상을 위해 공정변수의 최적화를 시도하였다. 또한 Gopal⁽¹⁰⁾ 등은 실리콘 재료의 연삭에서 표면거칠기와 표면품위를 구속조건으로 하고, 금속제거량을 극대화하기 위한 반응표면 모델을 개발하여 그 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 금형강(STD11)의 평면연삭 가공특성을 파악하기 위하여 연삭숫돌의 입도와 테이블의 이송속도 및 절입깊이 변화에 따른 연삭력과 표면거칠기를 측정하여 평가하고, 이들 실험 결과로부터 연삭력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 반응표면 모델(Response surface model)을 개발하여 그 유용성을 검증하고자 한다. 또한 실험결과의 평가에 있어서 기존의 정적연삭력 뿐만 아

* 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : jskwak5@pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1622 FAX : (051)620-1531

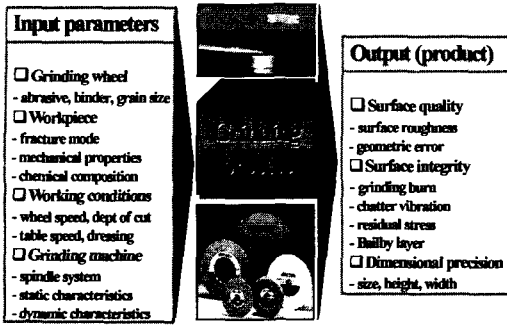


Fig. 1 Relation between grinding parameters and product results

나라 동적연삭력의 변화를 고찰하고, 스파크아웃에 따른 연삭특성을 평가하고자 한다

2. 이론적 배경

2.1 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 영향 정도와 최적의 공정결과를 얻을 수 있는 공정변수 값을 추출하는 방법을 말한다.⁽¹¹⁾

예를 들어, 어떤 특정공정에서 만들어진 제품의 평가에 있어서 그 측정량(ψ)이 온도(ζ_1)와 시간(ζ_2)에 따라 변화한다고 하면, 온도와 시간이 독립변수이고 측정량은 반응변수가 된다. 이때 온도와 시간의 변화에 따른 적절한 실험을 통하여 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 ψ 에 관한 측정치 y_1, y_2, y_3 등을 얻고, 이들을 통계적으로 분석함으로써 소기의 목적을 달성하게 되는 것이다.

일반적으로 반응표면 분석에서는 편리를 도모하기 위해서, 독립변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 를 선형변환(Linear transformation)시켜서 다음과 같이 새로운 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 를 정의하여 사용하게 된다.

$$x_i = \frac{\zeta_i - \zeta_{0i}}{c_i} \quad (1)$$

식 (1)에서 ζ_{0i} 는 보통 ζ_i 의 측정된 값들의 평

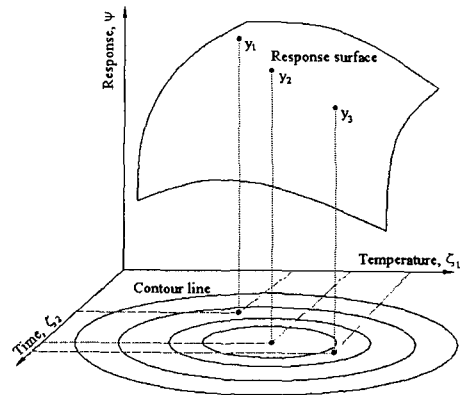


Fig. 2 Conceptual plot of response surface model

균치이고, c_i 는 x_i 의 값을 간단하게 해주기 위한 상수로 x_i 의 값이 -1에서 +1사이에서 위치하도록 c_i 를 잡아준다. 만약, x_i 들의 흥미영역에서 ψ 와 x_1, x_2, \dots, x_k 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.

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

이것은 함수 $f(x)$ 를 원점(x_0)에 대하여 이차 Taylor 급수전개를 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f(x) &= f(0) + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_0} x_i \\ &+ \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right)_{x_0} \frac{x_i^2}{2!} + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{x_0} x_i x_j \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $f(0)$ 를 β_0 로 놓고, $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_0}$ 와

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right)_{x_0} / 2! \text{ 및 } \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{x_0}$$

를 각각 $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 라 놓으면 식 (2)와 (3)은 동일한 것임을 알 수 있다. 식 (2)에서 β_i 는 반응표면 모델의 특성을 나타내는 계수이다. 반응표면 모델의 표현을 단순화하기 위해서 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[Y] = [b][X] + [E] \quad (4)$$

여기서 $[X]$ 는 실험조건들로 구성되는 행렬이고

[Y]는 실험결과치들로 구성되는 행렬이다. 또한 [E]는 실험에서 발생하는 오차이고 [b]는 반응표면 모델의 계수행렬이다. 식 (4)에서 행렬의 연산을 이용하여 반응표면 모델의 계수행렬을 구하면 다음과 같다.

$$[b] = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T [Y] \quad (5)$$

식 (5)에서 [X]^T은 [X] 행렬의 전치행렬(Transpose matrix)이고, ([X]^T [X])⁻¹은 [X]^T [X] 행렬의 역행렬(Inverse matrix)을 의미한다.

2.2 연삭력 이론

평면연삭에서 연삭력(Grinding force)은 소요동력과 직접 관련되는 접선방향 분력(F_t), 소요동력에는 직접 관계가 없지만 진동의 유발, 공작기계의 강성과 다듬질 정도에 관한 문제에서 중요하게 취급되는 법선방향 분력(F_n), 테이블의 이송 속도에 비례하지만 상대적으로 크기가 작은 이송 분력(F_f)으로 나누어진다. 연삭력의 해석을 위해서 이상적인 가정에 기초를 두고 연삭숫돌에 분포한 입자 1개의 연삭상태를 모델화하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 숫돌입자들이 숫돌의 동일 원주상에 배열되어 있고, 숫돌입자의 원주각(γ)이 일정하고, 숫돌입자의 중심축은 숫돌의 반지름 방향으로 향하며, 숫돌입자는 평균절삭깊이(g)를 절삭한다고 가정하자. 절삭방향으로 ψ만큼 기울어진 미소부분 OAB의 면적 ds에 작용하는 연삭력 dp는 다음과 같다.⁽¹⁾

$$dp = K_s ds \cdot \cos \gamma \cdot \cos \psi \quad (6)$$

이때 K_s는 비절삭력이며, 미소면적은 원주축선의 길이 ρ로부터 다음의 관계가 성립한다.

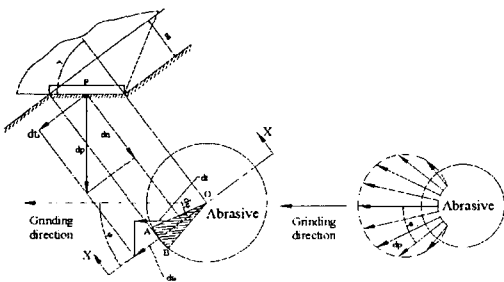


Fig. 3 Ideal grinding force model for an abrasive

$$ds = \frac{1}{2} \rho^2 \sin \gamma \cdot d\psi \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$dp = \frac{1}{2} \rho^2 K_s \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot \cos \psi \cdot d\psi \quad (8)$$

식 (8)에서 dp를 접선방향과 법선방향의 각 성분 dt와 dn으로 나누고, ψ를 -π/2 ~ π/2 까지 적분하면 연삭입자 1개에 작용하는 접선연삭력(f_t)과 법선연삭력(f_n)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_t = \frac{\pi}{4} K_s g^2 \cdot \sin \gamma \quad (9)$$

$$f_n = K_s g^2 \sin \gamma \cdot \tan \gamma \quad (10)$$

한편, 연삭숫돌과 공작물의 접촉영역에 있어서 절삭에 관여하는 동시 연삭입자의 수(접촉호상에 분포된 연삭입자의 수)를 j라고 하면 이론적인 접선연삭력과 법선연삭력은 다음과 같다.

$$F_t = \frac{\pi}{4} \cdot j \cdot K_s g^2 \cdot \sin \gamma \quad (11)$$

$$F_n = j \cdot K_s g^2 \cdot \sin \gamma \cdot \tan \gamma \quad (12)$$

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 평면연삭 숫돌은 알루미늄(Al₂O₃)계의 WA입자와 비트리파이드 결합재(Vitrified bond)를 채용하여, 결합도는 K이고 직경 ϕ250mm, 폭 15mm의 치수를 갖는다. 공작물은 금형재료로 널리 사용되고 있는 금형강으로 길이(L) 100mm, 폭(W) 60mm, 높이(H) 20mm로 하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 공작물의 화학적 조성을 나타낸 것이다.

Photo. 1은 본 연구에 사용한 실험장치의 구성을 나타낸 것으로, 평면 연삭기(NAGASE SGH-6, Japan)에서 연삭가공시 발생하는 연삭력의 측정을 위해 압전형 공구동력계(Kistler, 9257B)를 연삭기 테이블에 설치하고 그 위에 공작물을 고정하였

Table 1 Chemical composition of specimen(wt. %)

Cr	C	Mn	Ni	Si	P	S
12%	1.5%	0.6%	0.5%	0.4%	0.03%	0.03%

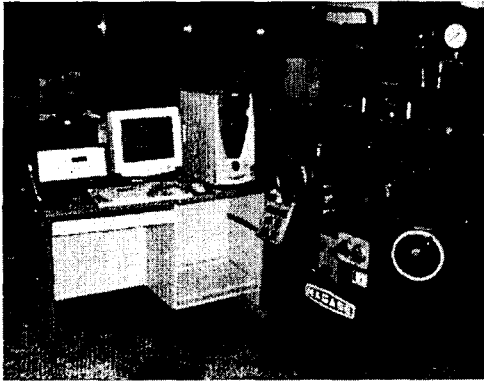


Photo. 1 Experimental set-up for surface grinding

다. 연삭가공시 공구동력계에서 발생된 신호는 다채널 증폭기(Kistler, 5019B)에서 증폭 및 필터링된 후 A/D 변환기(Adlink, 8112PG)를 거쳐 개인용 컴퓨터에 저장되고, 데이터처리 소프트웨어를 사용하여 실험에서 얻어진 연삭력을 평가하였다. 또한 연삭된 공작물의 표면거칠기는 촉침식 표면조도계(Mitutoyo, SURF-TEST 301)로 측정하였다. 실험조건의 변경시마다 연삭숫돌은 단석 다이아몬드 드레사로 20~30 μ m 정도 드레싱을 실시하였고, 모든 연삭가공은 상향연삭으로 수용성 유제를 사용한 습식연삭을 실시하였다. 숫돌의 원주속도는 1800rpm으로 일정하게 적용하였고, 입자의 크기는 #100, 220, 300으로 하였으며 절삭깊이는 5, 10, 20, 30 μ m, 테이블의 이송속도를 1.4, 2.5, 3.4, 4.6m/min까지 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

Fig. 4는 본 연구에서 정의한 정적연삭력과 동적연삭력의 개념을 도시한 것이다. 정상 연삭가공 중에도 시간의 경과에 따른 연삭력은 많은 변화가 발생하며, 이러한 연삭력의 변화는 각 실험 조건별 공작물과 연삭숫돌의 실제 접촉영역에서의 가공상태를 반영하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 연삭력을 크게 정적연삭력(Static grinding force)과 동적연삭력(Dynamic grinding force)으로

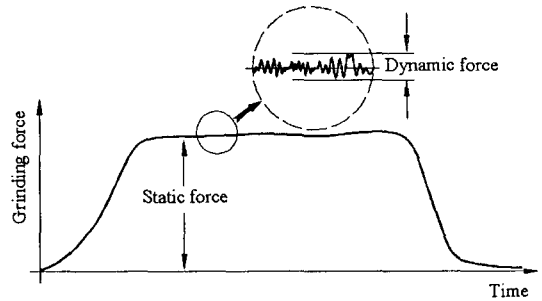


Fig. 4 Definition of static and dynamic grinding force in surface grinding process⁽²⁾

구분하여 고찰하였다.

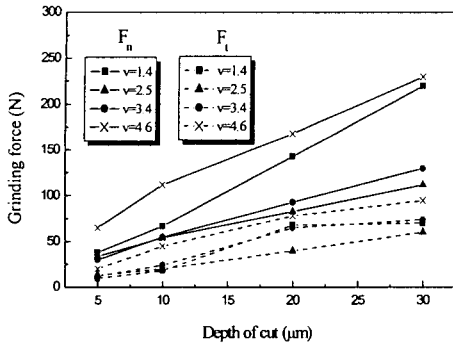
정적연삭력은 거시적 관점에서 연삭가공 중 가공시간의 경과에 따른 연삭력의 대략적인 변화를 나타낸다. 연삭숫돌과 공작물이 접촉을 개시하면 정적연삭력은 서서히 증가하여 거의 일정한 레벨에 도달하고, 연삭숫돌이 공작물을 벗어나면서 정적연삭력이 감소하게 된다. 이때 일정한 레벨의 평균치를 통상 연삭력으로 표현한다. 동적연삭력은 정상적인 연삭영역 내에서의 연삭력의 미시적 변화를 나타낸다.

4.1.1 정적연삭력 평가

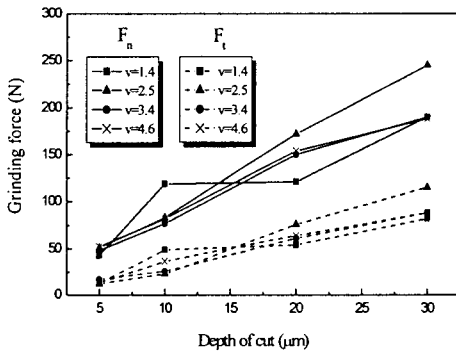
연삭조건 변화에 따른 정적연삭력의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 대부분의 연삭조건에서 접선연삭력 보다 법선연삭력이 대략 2~3배 정도로 크게 나타났고, 테이블 이송속도와 절입깊이의 증가에 비례하여 정적연삭력이 증가하였다. 또한 입도가 커질수록, 즉 입자의 크기가 작아질수록 연삭력은 증가하였다. 이러한 현상은 입도가 커질수록 단위면적당 절삭에 관여하는 입자의 수가 많아져서 각 입자당 작용하는 연삭력은 작아지나, 각 입자가 공작물을 파고들어 가는데 필요한 힘이 증가하고 또 숫돌에서 기공의 크기와 양이 작아져서 칩이 쉽게 배출되지 못하여 절삭력의 상승을 가져오는 요인으로 작용하기 때문이다.

4.1.2 동적연삭력 평가

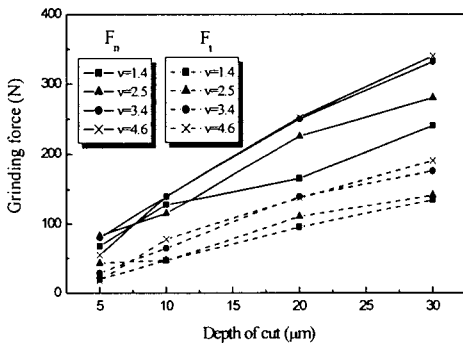
Fig. 6은 연삭조건 변화에 따른 동적연삭력의 변화를 나타낸 것이다. 그 결과를 살펴보면, 정적연삭력과 달리 입도가 커질수록 동적연삭력의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 이는 입도가 커질수록



(a) WA #100



(b) WA #220



(c) WA #300

Fig. 5 Effect of grinding conditions on static grinding force

연삭입자당 금속제거량이 작아져서 동적연삭력의 변동이 적은 안정적인 연삭이 가능함을 보여주는 것이다. 또한 동일한 입도에서는 절입깊이가 증가

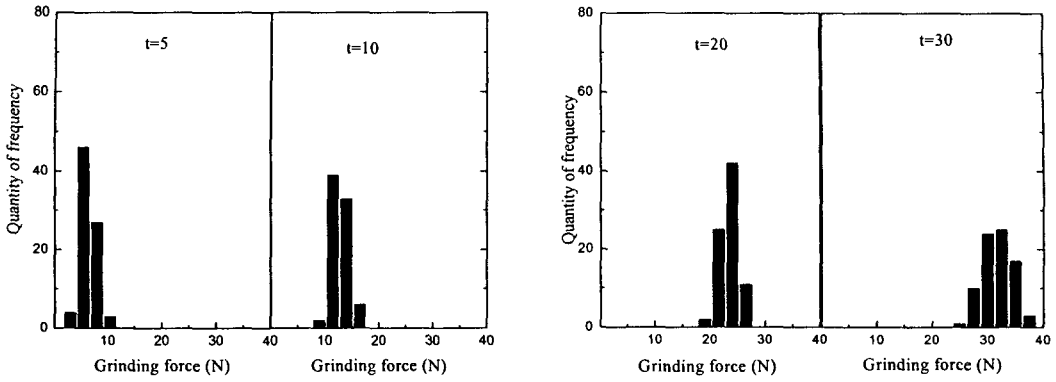
할수록 동적연삭력의 크기는 증가하고, 동적연삭력의 변동이 심해져서 동적연삭력이 넓게 분포하는 경향을 알 수 있다. 이러한 동적연삭력의 분포 변화는 불안정한 연삭가공으로 이어져 연삭열이 높아지는 결과를 초래하고, 다듬질면의 결정조직 변화와 잔류응력 등에 영향을 미쳐 공작물의 표면 품질에 악영향을 끼치는 요인으로 작용할 것으로 사료된다.

4.2 표면거칠기의 변화 특성

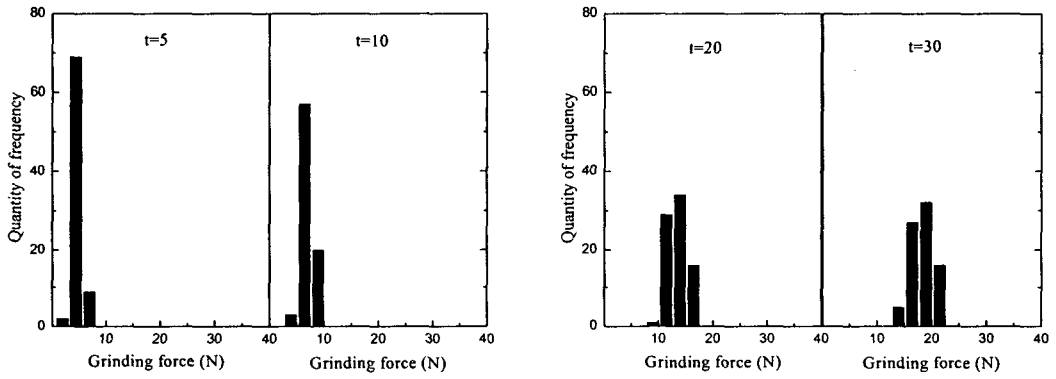
연삭조건 변화에 따른 공작물의 표면거칠기 변화를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)에 나타낸 중심선 평균 표면거칠기의 변화를 살펴보면, 입도가 커질수록 또 절입깊이와 테이블의 이송속도가 낮아질수록 표면거칠기가 거의 선형적으로 향상됨을 알 수 있었다. 특히 연삭가공후에 얻을 수 있는 공작물의 중심선 평균 표면거칠기는 다른 어떤 연삭조건보다 입도에 따라서 명확히 구분되는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 7(b)의 최대높이 표면거칠기는 중심선 평균 표면거칠기와는 달리 입도에 따라 얻을 수 있는 거칠기 범위가 명확한 구분되지 않는 특징을 나타내었다. 이는 최대높이 표면거칠기가 중심선 평균 표면거칠기와 같이 공작물의 평균화된 거칠기를 나타내는 것이 아니라, 공작물내에서 가장 좋지 못한 표면거칠기를 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 증가할수록 최대높이 표면거칠기가 나빠지는 경향을 나타내었다.

4.3 스파크아웃 효과

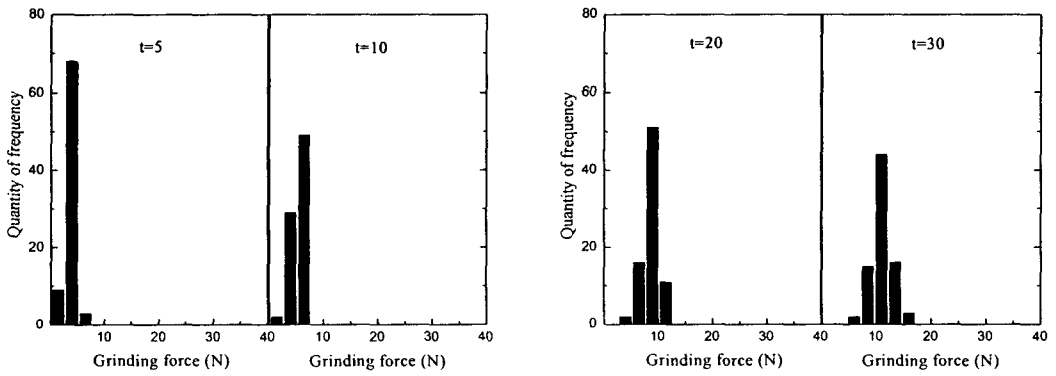
Fig. 8은 입도 #220 연삭숫돌로 테이블의 이송 속도 2.5m/min, 절입깊이 10 μ m로 공작물을 가공한 후 스파크아웃을 실시하여 그 횟수의 증가에 따른 정적연삭력의 변화를 나타낸 것이다. 스파크아웃의 횟수가 증가할수록 정적연삭력은 급격히 감소하다가 대략 5~10회 사이에 일정한 값에 도달하였다. 이때의 정적연삭력은 실제 연삭가공에 의한 절삭력이라기 보다는 공작물과 연삭숫돌의 구름접촉(Rolling contact)시 미끄럼에 의한 마찰력이라고 생각된다. 따라서 이때의 접선연삭력 및



(a) WA #100

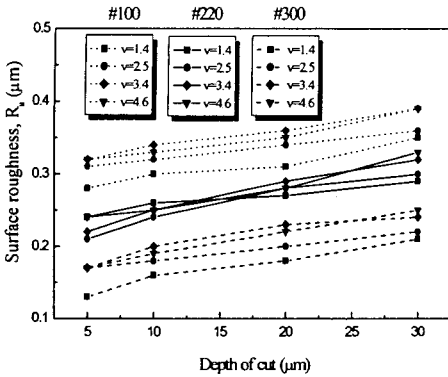


(b) WA #220

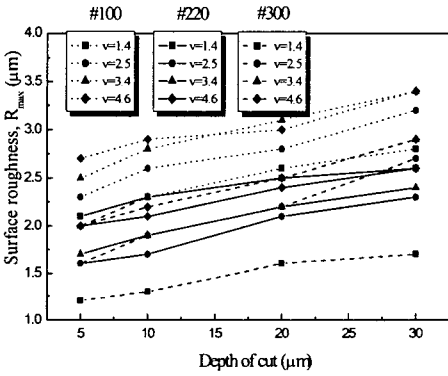


(c) WA #300

Fig. 6 Distribution of dynamic grinding force



(a) R_a



(b) R_{max}

Fig. 7 Effect of grinding conditions on surface roughness

범선연삭력 사이의 관계를 이용하여 연삭숫돌과 공작물의 마찰계수(μ)를 구하면 대략 0.13~0.22 정도임을 알 수 있다.

스파크아웃 횟수에 따른 표면거칠기의 향상 정도를 평가하여 그 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 전체적으로 스파크아웃 횟수가 증가할수록 표면거칠기는 향상되나 횟수가 증가함에 따른 표면거칠기 향상 정도는 미미하여 큰 의미가 없거나, 연삭숫돌의 불평형정도에 따라서 오히려 표면거칠기가 나빠지는 경우도 발생하였다. 따라서 표면거칠기 향상과 생산성의 측면을 고려하면 본 연구와 같이 절입깊이가 적은 경우, 스파크아웃의 실시횟수는 2~3회 정도가 적당하리라 생각된다.

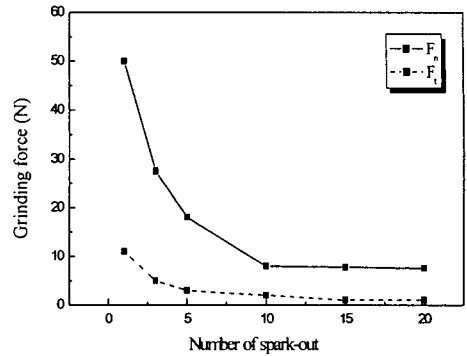
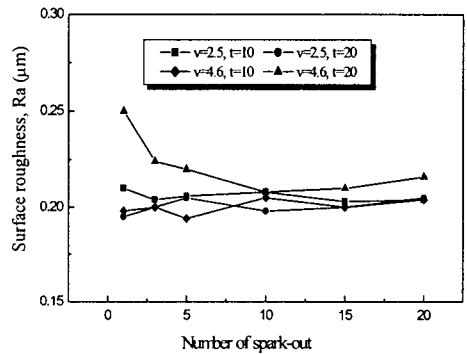
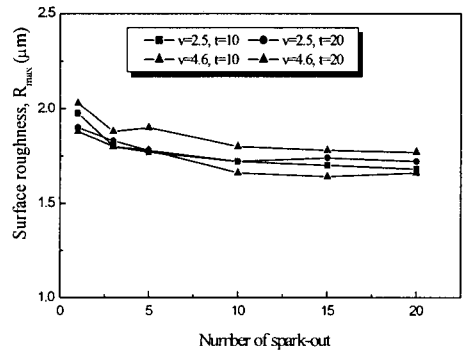


Fig. 8 Effect of the number of spark-out on static grinding force



(a) R_a



(b) R_{max}

Fig. 9 Effect of the number of spark-out on surface roughness

Table 2 Coefficients of response surface model

	F_t	F_n	R_a
β_0	75.0342	65.6230	0.269171
β_1	2.0254	1.6921	0.002307
β_2	-6.9189	4.1837	0.025372
β_3	-0.9360	-0.8433	-0.000056
β_{11}	-0.0564	-0.0638	-0.000015
β_{22}	0.7136	0.4538	-0.003096
β_{33}	0.0022	0.0027	-0.000001
β_{12}	0.2991	1.2038	0.000250
β_{13}	0.0133	0.0180	0.000001
β_{23}	0.0154	-0.0542	-0.000006

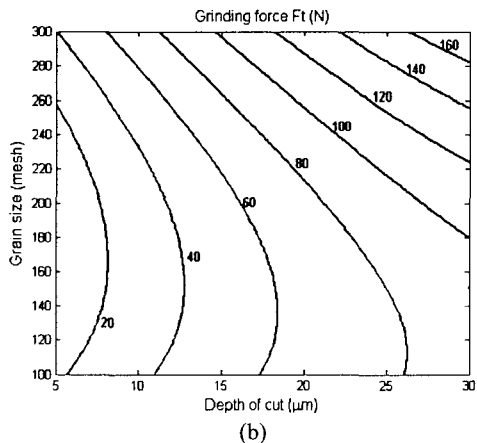
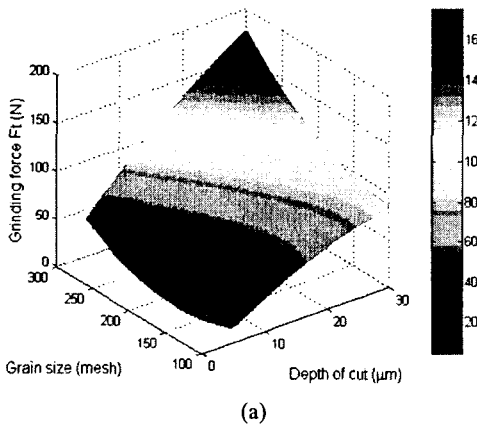


Fig. 10 Grinding force (F_t) response surface and contour plot according to depth of cut and grain size (Table speed : 4.6m/min)

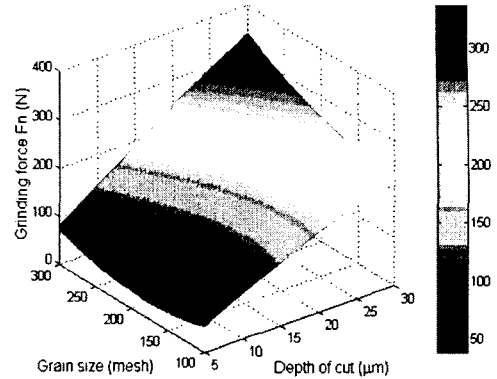


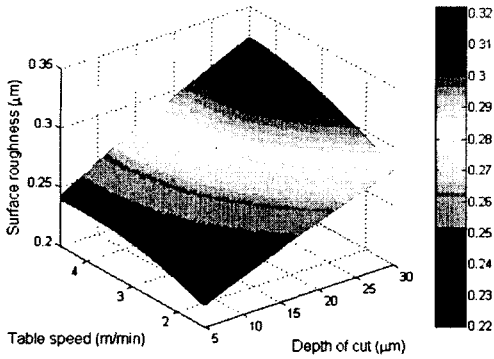
Fig. 11 Grinding force (F_n) response surface and contour plot according to depth of cut and grain size (Table speed : 4.6m/min)

5. 반응표면 모델의 개발과 검증

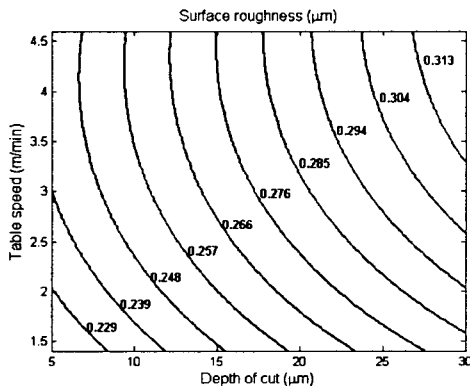
실험결과들로부터 접선 및 법선연삭력과 표면 거칠기를 예측할 수 있는 2차 반응표면 모델을 개발하였다. 반응표면 모델 개발에서 연삭공정 변수는 절입깊이(t), 테이블 이송속도(v) 및 연삭숫돌의 입도(m)를 사용하였으며, 반응표면과 변수들의 관계는 식 (13)과 같이 나타내었다.

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

반응표면 모델의 입력변수 행렬과 실험결과치들



(a)

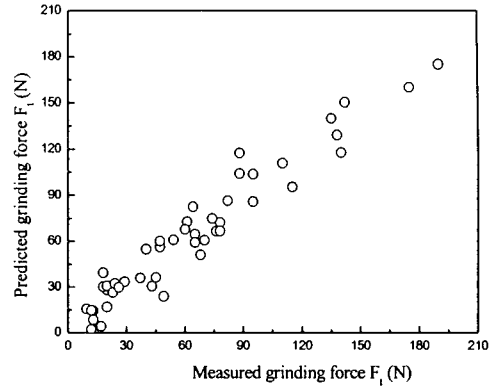


(b)

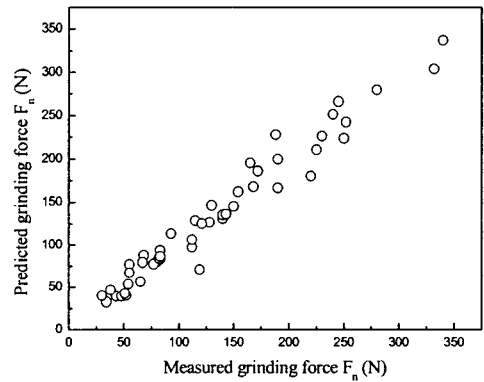
Fig. 12 Surface roughness (R_a) response surface and contour plot according to depth of cut and table speed (Grain size : #220)

로 구성되는 행렬을 적용하여, 반응표면 모델의 계수행렬은 식 (5)를 이용하여 구하였다. 행렬의 연산은 상용 소프트웨어인 Matlab을 이용하였다. 구해진 반응표면 모델의 계수를 Table 2에 나타내었다.

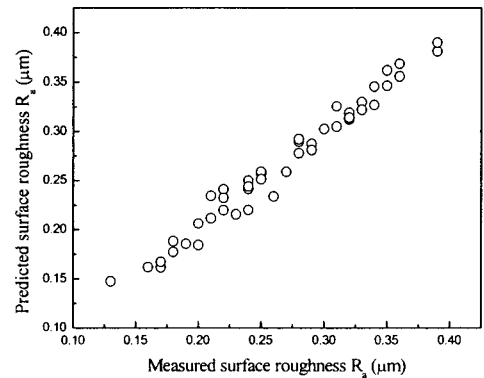
Fig. 10~12는 연삭공정 변수와 반응표면의 관계를 3차원 그래프와 2차원 윤곽선도를 각각 도시한 것이다. 3차원 그래프에서는 연삭공정 변수의 변화에 따른 반응표면의 변화경향을 쉽게 확인할 수 있고, 2차원 윤곽선도를 이용하면 적용할 연삭조건에 따라 얻을 수 있는 연삭력과 표면거칠기를 구할 수 있으므로 연삭조건 선정이 용이하다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 13 Verification results for second-order response surface model

개발된 반응표면 모델의 예측치와 실험을 통하여 구해진 연삭력과 표면거칠기의 관계를 Fig. 13에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 전체적으로 연삭력과 표면거칠기의 예측치와 실험치가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 개발된 2차 반응표면 모델은 연삭력과 표면거칠기의 예측에 유효함을 알 수 있다. 이러한 반응표면 모델을 이용하면 본 연구에서 적용하지 않은 연삭조건에서도 연삭력과 표면거칠기를 예측하는 것이 가능해진다.

6. 결론

본 연구는 금형강의 평면연삭 가공특성을 평가하기 위한 실험 및 해석적 방법을 적용한 것으로 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 연삭조건 변화에 따른 정적연삭력은 법선연삭력이 접선연삭력의 2~3배 정도로 크게 나타났고, 동적연삭력은 입도가 작아질수록 또 절입깊이가 증가할수록 증가함을 알 수 있었다.

(2) 스파크아웃 횟수에 따른 정적연삭력과 표면거칠기 변화를 평가하였고, 스파크아웃시 접선연삭력과 법선연삭력의 관계를 이용하여 연삭숫돌과 공작물의 마찰계수가 대략 0.13~0.22 정도임을 알 수 있었다.

(3) 연삭조건 변화에 따른 연삭력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 2차 반응표면 모델을 개발하였다. 개발된 반응표면 모델의 예측치는 실험치와 잘 일치하였다.

참고문헌

(1) Kwak, J.S. and Ha, M.K., 2002, "Evaluation of Wheel Life by Grinding Ratio and Static Force," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 9, pp. 1072~1077.

(2) Kwak, J.S. and Ha, M.K., 2004, "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.

(3) Kwak, J.S. and Ha, M.K., 2004, "Neural

Network Approach for Diagnosis of Grinding Operation by Acoustic Emission and Power Signals," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 147, No. 1, pp. 65~71.

(4) Shaji, S. and Radhakrishnan, V., 2003, "Analysis of Process Parameters in Surface Grinding with Graphite as Lubricant Based on the Taguchi Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 141, No. 1, pp. 51~59.

(5) Dhavlikar, M.N., Kulkarni, M.S. and Mariappan, V., 2003, "Combined Taguchi and Dual Response Method for Optimization of a Centerless Grinding Operation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, No. 1-3, pp. 90~94.

(6) Kopac, J., Bahor, M. and Sokovic, M., 2002, "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.

(7) Lin, T.R., 2002, "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.

(8) Lin, T.R., 2003, "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.

(9) Kulkarni, M.S. and Mariappan, V., 2003, "Multiple Response Optimization for Improved Machined Surface Quality," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 141, No. 2, pp. 174~180.

(10) Gopal, A.V. and Rao, P.V., 2003, "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.

(11) Hogg, R.V. and Ledolter, J., 1992, *Applied statistics for engineers and physical scientists*, Macmillan Publishing Company, New York, pp. 403~417.