

연삭력을 이용한 공작물의 형상오차 예측

지용주⁺, 광재섭⁺⁺, 하만경^{*}

(논문접수일 2003. 11. 5, 심사완료일 2003. 12. 19)

Geometric Error Prediction of Ground Surface by Using Grinding Force

Long-Zhu Chi⁺, Jae-Seob Kwak⁺⁺, Man-Kyung Ha^{*}

Abstract

Because a generated heat during grinding operation makes a serious deformation on a ground surface as a convex form, a real depth of cut in deformed zone has larger than an ideal depth of cut. Consequently, the ground surface has a geometric error as a concave form after cooling the workpiece. In this study, the force and the geometric error of surface grinding were examined. From evaluating magnitude and mode of the geometric error according to grinding conditions, an optimal grinding condition was proposed to minimize the geometric error. In addition, the relationship between the geometric error and the grinding force was found out. Due to least square regression, it was able to predict the geometric error by using the grinding force.

Key Words : Surface Grinding(평면연삭), Geometric Error(형상오차), Grinding Force(연삭력), Least Square Regression(최소자승법)

1. 서론

연삭가공은 제품의 마무리 가공 공정으로 치수 정밀도 및 표면성상이 우수한 제품을 얻을 수 있는 장점이 있어 표면가공에 폭넓게 사용되어지고 있다. 평면 연삭에서의 평면도나 직진도 등 형상오차는 정밀기기의 직선 정도나 위치결정 정도에 직접 관계될 뿐 만 아니라 제품의 양부를 결정짓는 중요한 요인이다. 연삭열이나 잔류응력에 의한 공

작물의 변형⁽¹⁾, 연삭점에서 발생하는 국부적 열변형⁽²⁾, 유막에 의한 테이블의 부상⁽³⁾, 스톨과 공작물의 접촉 강성 등이 형상오차에 지배적인 영향을 미치는 것으로 밝혀져 있다⁽⁴⁾. 평면연삭 시 발생하는 과도한 연삭열로 인해 공작물은 볼록한 형태(Convex Form)로 변형하게 된다. 그 결과로 스톨은 공작물의 볼록한 변형부분을 연삭 할 때 설정 절삭깊이보다 과도한 연삭을 행하게 되고, 이로 인해 공작물이 냉각하게 되면 공작물은 오목한 형태(Concave Form)로

+ 부경대학교 대학원

++ 부경대학교 기계공학부

* 주저자, 부경대학교 기계공학부 (hmk@pknu.ac.kr)

주소: 608-739 부산시 남구 용당동 산 100

남게 된다. 이러한 형상오차는 최종 제품의 형상정밀도를 저하시키고 제품의 양부를 결정짓는 중요한 요인이 되므로, 형상오차의 크기를 정량적으로 평가하는 연구가 필요하다. 이를 위해 많은 이론적 및 실험적인 연구가 이루어지고 있다.

Nakano 등⁽⁵⁾은 평면연삭에서 가공 중에 일어나는 공작물의 열변형과 연삭 후 공작물의 형상오차에 대해서 이론과 실험적인 연구를 하였다. 또 Okuyama 등⁽⁶⁾은 단공정 연삭에서 열변형 거동을 유한요소법으로 밝히고, 실험을 통하여 공작물의 직진도를 측정함으로써 해석결과의 타당성을 검증하였다.

연삭가공 중 연삭 열 및 이로 인해 생성하는 공작물의 열변형, 그리고 슷돌촉과 공작물의 탄성변위는 연삭저항으로 인해 발생하며, 이들은 결국 연삭 가공 면의 형상오차를 생성한다. 때문에 연삭저항과 가공 면 형상오차간의 상관관계를 정확히 파악할 필요가 있다.

본 논문에서는 고속도강(SKH51)을 입도가 다른 WA 슷돌로 평면연삭할 때 연삭력을 검증하고, 연삭가공된 공작물의 형상오차를 측정하였다. 가공조건의 변화에 따른 형상오차의 형태 및 크기를 평가하였으며, 형상오차를 최소화할 수 있는 최적의 연삭가공조건을 제시하였다. 또한 얻어진 연삭력의 변화량과 형상오차를 선형회귀분석 기법을 이용하여 상관관계를 규명하고, 연삭력을 이용한 공작물의 형상오차 예측이 가능하도록 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 연삭력

연삭가공 중에 연삭스틀 또는 공작물이 연삭점에서 받는 힘을 연삭력 또는 연삭저항이라 한다. 이러한 연삭력은 접선연삭분력 (F_t), 법선연삭분력 (F_n), 축방향분력 (F_s) 등 세 개의 서로 수직되는 분력으로 나눌 수 있다. 다른 절삭가공에서와는 달리 연삭가공에서는 법선연삭분력이 가장 크며 통상적인 가공조건에서는 접선연삭분력의 2.0~2.5배로 나타난다. 연삭분력을 구하는 일반화된 이론식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_t = i \cdot t = k_s \cdot b \cdot z \cdot \frac{v_w}{v} \quad (1)$$

$$F_n = i \cdot n = \lambda \cdot k_s \cdot b \cdot z \cdot \frac{v_w}{v} \quad (2)$$

여기서, i 는 동시 연삭날의 수이고, t 와 n 은 연삭입자

한 개의 접선방향과 법선방향의 연삭력이고, λ 는 법선방향과 접선방향의 연삭력 비를 나타낸다. 또한 k_s 는 비연삭 저항을 나타내며 b 는 연삭폭, z 는 연삭깊이, v_w 와 v 는 공작물의 속도와 슷돌의 속도를 나타낸 것이다⁽⁷⁾.

2.2 공작물의 평균온도

연삭 시 발생하는 연삭열의 일부가 직접 공작물에 유입되고, 그 결과 공작물 전체의 온도가 상승한다. 공작물의 평균온도 상승은 공작물의 열팽창을 일으켜 치수정밀도와 형상정밀도에 영향을 끼친다. 공작물 평균온도 (θ_w)에 미치는 가공조건의 영향은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$\theta_w \propto z^{0.88} \cdot v^{0.25} \cdot v_w^{-0.25} \quad (3)$$

이 식으로부터 공작물의 평균온도를 낮게 하기 위해서는 연삭깊이와 슷돌속도를 적게 하고 공작물속도를 크게 해야 함을 알 수 있다. 공작물속도가 증가하면 연삭력이 커짐에도 불구하고 온도가 저하한다는 것은 공작물이 슷돌과 접촉하여 가열되는 시간이 짧아지기 때문이다.

2.3 선형회귀분석 이론

도표화된 데이터를 시각적으로 조사한 후에 점들을 통과하는 최적의 선을 그려내는데 있어서 완전한 직선으로 정의할 수 없는 경우는 보간법이 널리 사용된다. 여기에서 주관성을 배제하고 적합한 곡선을 긋기 위한 한 가지 방법이 데이터 점들과 곡선의 거리오차를 최소화시키는 곡선을 유도하는 것인데, 이 목적을 성취하는 기법을 회귀분석(Regression)이라 한다.

회귀분석의 가장 간단한 예는 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$ 의 관측치에 직선을 적합시키는 것이다. 이를 선형회귀분석이라 하고, 이 직선에 대한 수학적 표현은

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + e_i \quad (4)$$

이고, a_0 은 절편, a_1 은 기울기, e 는 관측치와 근사 직선의 오차이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_i = y_i - a_0 - a_1 x_i \quad (5)$$

데이터의 흐름을 나타내는 최적의 직선을 구하는 방법 중 하나는 오차의 합을 최소화시키는 것이다. 즉, n 이 점들의 개수를 나타낼 때 오차의 제곱 합은 다음과 같다.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (6)$$

a_0 와 a_1 값을 결정하기 위해 식 (6)을 각각의 계수에 대하여 편미분을 취하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i) \quad (7)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum [(y_i - a_0 - a_1 x_i)x_i] \quad (8)$$

도함수가 0이라는 사실은 S_r 을 최소화한다는 의미로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$0 = \sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_i \quad (9)$$

$$0 = \sum y_i x_i - \sum a_0 x_i - \sum a_1 x_i^2 \quad (10)$$

$\sum a_0 = na_0$ 이므로 이 식은 a_0, a_1 에 대한 2원 1차 방정식으로 주어진다.

$$na_0 + \sum x_i a_1 = \sum y_i \quad (11)$$

$$\sum x_i a_0 + \sum x_i^2 a_1 = \sum x_i y_i \quad (12)$$

이것을 정규방정식(Normal Equation)이라 부르며, 이 방정식을 풀면 다음과 같이 된다.

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (13)$$

이 결과를 식 (11)에 대입하면,

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x} \quad (14)$$

을 얻는다. 여기서 \bar{y} 와 \bar{x} 는 각각 y 의 평균과 x 의 평균이다.⁽⁸⁾

2.4 연삭가공 면의 형상오차

Fig. 1은 연삭가공 시 열변형과 탄성변형에 의한 형상오차의 생성 원리 및 형태를 모델화하여 나타낸 것이다. 과도한 연삭열로 인해 공작물은 A와 같은 볼록한 형태로 변형하게 된다. 또한 연삭가공중에 연삭저항으로 인하여 스톱축 및 공작물은 탄성변위가 발생하여, 스톱축의 실제 운동 궤적은 설정한 운동궤적 C와 다른 B의 경로를 따르게 된다.

따라서 연삭가공 중 실제의 절입깊이는 설정 절입깊이와 달라지며 그 만큼 절삭잔량으로 존재한다. 실제의 절입깊이는 가공 중 수시로 변화하고, 이러한 변화 때문에 연삭가공 중의 연삭력도 변화하며, 가공 면에는 결국 평면도나 직진도와 같은 형상오차가 발생한다.

열변형에 의해 공작물은 볼록한 형태로 되어 이는 실제 절입깊이를 크게하고, 결국 냉각된 공작물은 오목한 형태의 형상오차가 발생한다. 반대로 스톱축과 공작물의 탄성변위는 실제 절입깊이를 작아지게 하는데, 이러한 탄성변위는 연삭이 시작되는 부분부터 서서히 축적되어 연삭이 끝날 때 제일 커지기 때문에, 결국 공작물은 탄성변위에 의해서 연삭이 끝나는 점이 시작 점 보다 높아지는 형태의 형상오차가 발생하게 된다. 공작물의 열변형과 스톱축 및 공작물의 탄성변위는 형상오차에 미치는 영향이 서로 다르기 때문에,

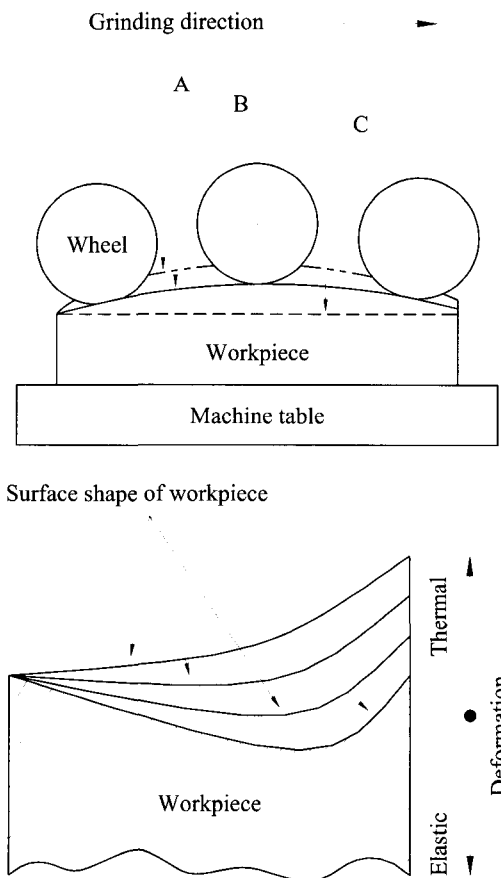


Fig. 1 Patterns of the workpiece deformation

가공조건이 다를 때 가공 면의 양상도 서로 다르다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험장치 및 방법

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험 장치를 개략적으로 나타낸 것으로, 평면연삭기의 테이블에 공구동력계(Tool Dynamometer)를 설치한 후 연삭가공 시 발생하는 연삭력의 아날로그 신호는 증폭기를 통해 증폭되고 이를 12비트의 분해능력을 지닌 A/D 변환기를 통해 디지털화 하여 PC에서 데이터를 처리하였다. 삼차원 측정기를 이용하여 연삭 방향으로 공작물 표면의 좌표 값들을 측정하였고, 그 값으로 형상오차의 크기를 평가하였다. 본 실험에서는 상향연삭을 실시하였으며, 주축의 회전속도를 1,800rpm으로 일정하게 유지하고, 연삭깊이를 5~15 μm 까지 5 μm 씩 변화시켰으며, 테이블의 이송속도를 7.6m/min, 10.2m/min, 12.4m/min, 14.2m/min씩 단계적으로 변화하면서 실험하여 연삭력과 형상오차를 측정하였다. 실험조건은 변경 시마다 단석 다이아몬드 드레사로 30 μm 정도 드레싱을 실시하였다. 이에 사용된 실험장치의 사양과 연삭조건은 각각 Table 1, 2와 같다. 또한 공작물의 화학적 조성을 Table 3에 나타내었다.

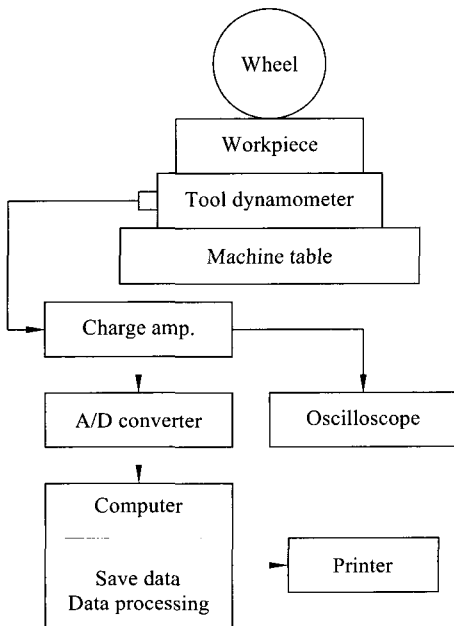


Fig. 2 Experimental set-up

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 연삭가공 면 양상

Fig. 3은 특정한 연삭조건에서의 연삭가공 면의 양상을 측정하여 나타낸 것이다. (a)에서 볼 수 있듯이 연삭부하가 작은 습식 연삭에서는 연삭열에 의한 열변형은 아주 작고, 슛돌 축과 공작물의 탄성변위가 주된 요인이기 때문에 연삭가공 면은 연삭이 끝나는 점이 연삭 시작 점 보다 높아지는 경사면으로 나타내고 있다. 반대로 (b)에서 볼 수 있듯이 건식연삭에서는 열변형이 주된 요인이므로 연삭가공 면은 오목한 형태를 나타내고 있다.

3.2.2 연삭력

Fig. 4는 공구동력계를 통해 얻어진 연삭력 신호를 A/D 변환기를 통해서 컴퓨터에 저장한 예를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 연삭력은 순간적 요동뿐만 아니라 실제 절입깊이의 변화에 따라서도 변화되고 있다. 본 연구에서 연삭력은 안정상태의 정적크기를 나타내는 정적 연삭력(Static Force)과 안정상태에서의 미소변화를 나타내는 연

Table 1 Experimental equipments

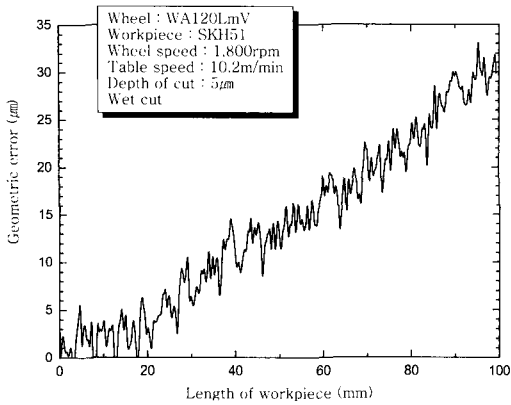
Instrument	Model
Grinding machine	Horizontal spindle surface grinder
Grinding wheel	WA46KmV, WA120KmV, WA200KmV (225×20×50.8mm)
Workpiece	SKH51(HRC55) (100×90×20 mm)
3D Coordinate Measuring Device	OMS-600(Mahr, Germany)

Table 2 Experimental condition

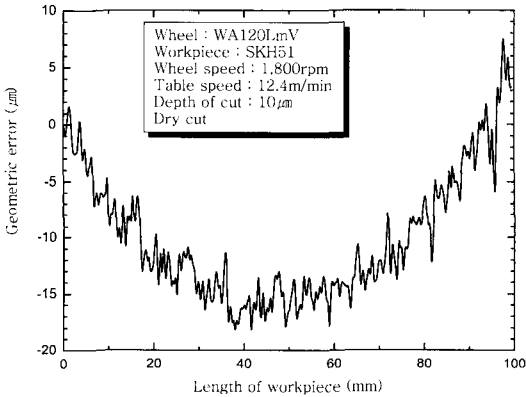
Item	Conditions
Wheel speed	1,800rpm
Table speed	7.6, 10.2, 12.4, 14.2(m/min)
Depth of cut	5, 10, 15(μm)
Dressing condition	Single point diamond dresser
Grinding type	Plunge & Up-grinding& Dry cut

Table 3 Chemical composition(%) of workpiece

	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo	V
SKH51	0.88	0.24	0.29	0.02	0.002	4.01	5.6	4.62	1.63



(a)



(b)

Fig. 3 Examples of geometric error in workpiece

삭력 변화량(Change of Force)으로 구분하였다. 정적 연삭력의 크기는 안정상태에서의 연삭력의 크기를 평균하여 값을 취하였다. 또한 연삭력 변화량은 안정상태에서의 연삭력의 분포를 Fig. 5와 같이 구하여, 전체 데이터에서 최대, 최소 10%를 각각 제외한 나머지 데이터의 분포 크기로 정의하였다.

Fig. 6은 #46, #120, #200 슷돌에서 연삭깊이가 각각 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m일 때, 테이블 속도 변화에 따른 형상오차 연삭력을 나타낸 것이다. 연삭깊이와 테이블 속도가 커짐에 따라 연삭력은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 단위 시간당 연삭량이 많아질수록 큰 연삭에너지가 필요함을 나타내는 것이다. 또한 슷돌의 입도가 커짐에 따라 연삭력은 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 입도가 커질수록 단위면적당 입자의 수가 증가하고 그만큼 연삭스틀에서 칩이 배

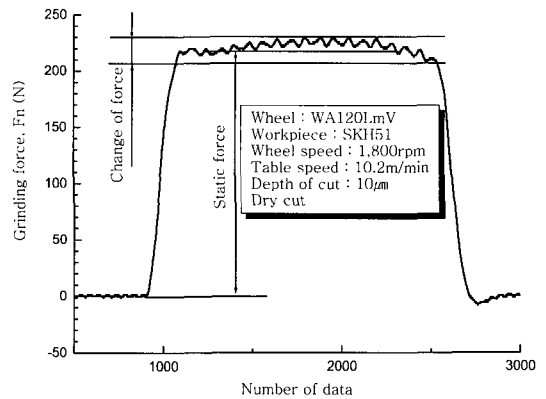


Fig. 4 An example of obtained force signal

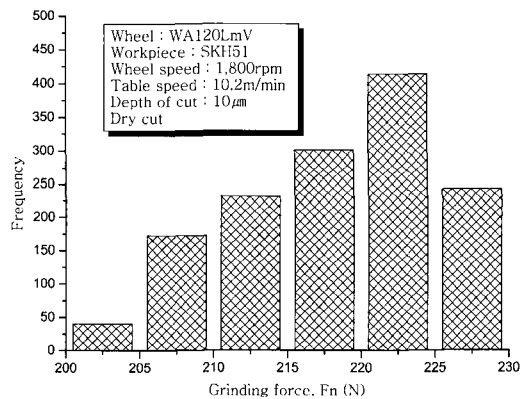


Fig. 5 Distribution of grinding force signal

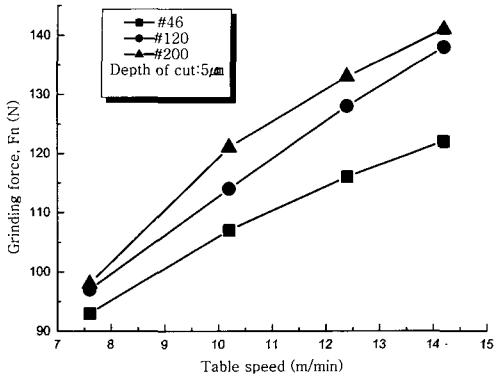
출될 수 있는 공간이 작아져 쉽게 연삭력이 증가하는 것으로 생각된다.

3.2.3 형상오차

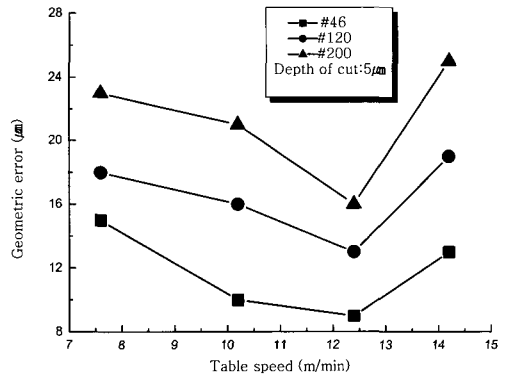
Fig. 7은 #46, #120, #200 슷돌에서 연삭깊이가 각각 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m일 때 테이블 속도에 따른 형상오차를 나타낸 것이다. 연삭깊이가 커짐에 따라 형상오차는 증가하는 경향을 나타냈다. 연삭깊이가 5 μ m와 10 μ m일 때는 테이블의 이송속도가 12.4m/min일 때 제일 작은 형상오차를 나타냈고, 연삭깊이가 15 μ m일 때는 테이블의 이송속도가 10.6m/min일 때, 제일 작은 형상오차를 나타내고 있다. 이것은 테이블 속도가 빨라짐에 따라 슷돌과 공작물의 접촉시간이 짧아지므로 열변형이 작아지기 때문이라고 사료된다. 그러나 테이블 속도가 계속 커지면 열변형이 작아지는 반면, 과도한 연

삭력으로 인한 슷돌 축과 공작물의 탄성변형이 현저히 증가함으로 형상오차는 반대로 커진다고 사료된다. 슷돌의 입도에 따른 형상오차는 입도가 커짐에 따라 형상오차는 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 입도가 커질수록 열변형 량과 슷

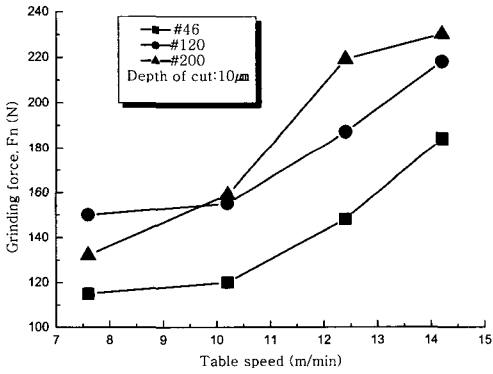
돌 축 및 공작물의 탄성변형 량이 증가하나, 탄성변형 량의 증가에 비해 열변형량의 증가가 크기 때문인 것으로 생각된다.



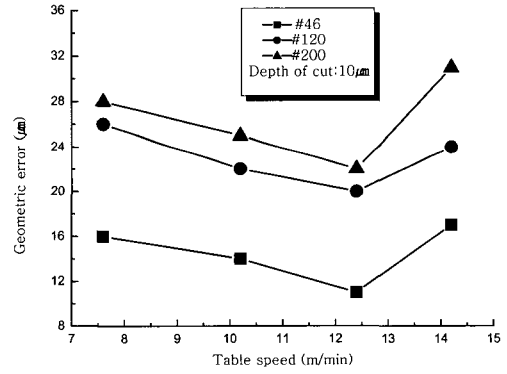
(a)



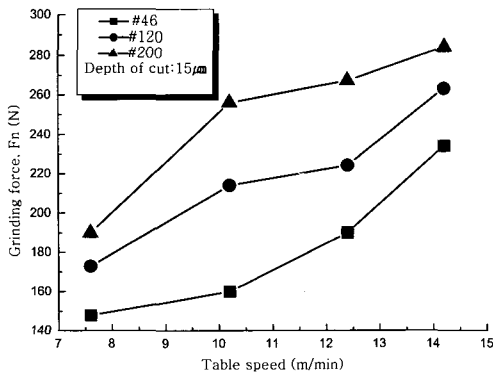
(a)



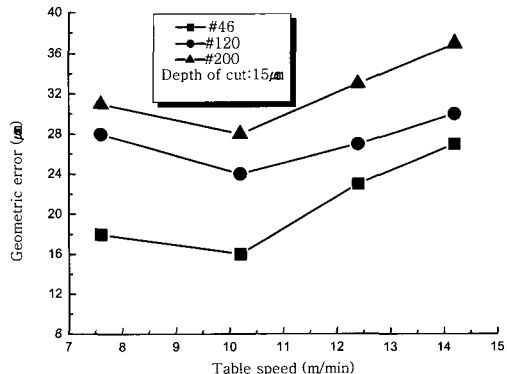
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 6 Static grinding force according to table speed

Fig. 7 Geometric error according to table speed

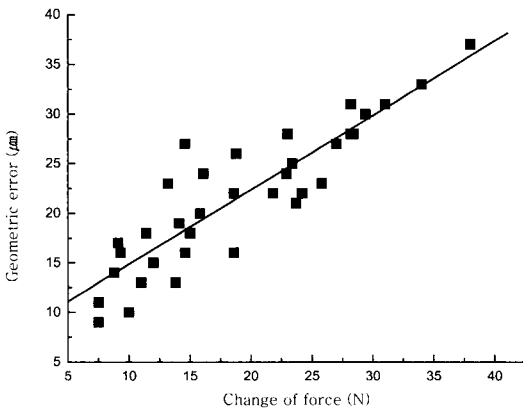


Fig. 8 Relationship between geometric error and change of force

Table 4 Analysis of regression data

요인	자승합	자유도	자승평균	F_0	$F_{(0.01)}$
회귀	1333.82	1	1333.82	131.40	7.5
잔차	345.15	34	10.15		
계	1678.97	35			

3.2.4 형상오차 예측

Fig. 6과 7에서 알 수 있듯이 연삭력과 형상오차의 관계는 크게 상관관계를 갖지 못하기 때문에 형상오차를 예측하기 위해서 연삭력의 변화량을 구하였다. 실험을 통해서 얻어진 연삭력의 변화량과 형상오차의 관계를 Fig. 8에 나타내었는데, 연삭력의 변화량과 형상오차는 선형관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 연삭력의 변화량을 ΔF_n , 형상오차를 δ 로 표시하고, ΔF_n 에 따른 δ 의 변화를 최소제곱회귀분석법을 이용하여 회귀 직선으로 구하면 다음과 같다.

$$\delta = 7.36 + 0.75\Delta F_n \quad (15)$$

회귀직선이 유의함을 알기 위한 분산분석표를 만들면 Table 4와 같다. 여기서 상관계수 $r = 0.891$ 및 $F_0 > F_{(0.01)}$ 로부터 회귀직선은 의미가 있고, 아주 유의함을 알 수 있다. 따라서 위의 회귀식으로부터 가공 중에 연삭력 변동량을 측정하면 형상오차를 예측하는 것이 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 평면연삭가공에서 WA 슛돌을 이용하여 고속도강을 테이블 속도 7.6m/min, 10.2m/min, 12.4m/min,

14.2m/min으로, 연삭깊이를 5~15 μ m까지 단계 변화시키면서 연삭가공한 후 연삭력과 형상오차를 측정하고 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 연삭 조건이 변함에 따라서 연삭가공 면은 각기 다른 표면양상을 나타내었다. 이는 연삭조건이 다를 때, 연삭열에 의한 공작물의 열변형과 슛돌 축 및 공작물의 탄성변형이 연삭가공 면 양상에 미치는 영향정도가 다르기 때문이라고 사료된다.
- (2) 테이블 속도와 연삭깊이가 증가함에 따라 연삭력은 증가하였고 연삭깊이가 증가함에 따라 형상오차도 크게 나타났다. 또한 연삭깊이가 5 μ m와 10 μ m에서는 테이블 속도가 12.4m/min에서 형상오차가 가장 작게 발생하였고, 연삭깊이가 15 μ m일 때는 이송속도 10.2m/min에서 형상오차가 가장 작게 발생하였다.
- (3) 연삭력의 변화량이 커짐에 따라 형상오차도 크게 나타났으며, 양자는 비교적 정확한 선형관계를 가지고 있음을 알 수 있다.
- (4) 결론적으로 연삭면 형상오차는 정적연삭력의 크기와는 일정한 관계가 없고, 연삭력의 변화량과 선형관계가 있음을 알 수 있고, 특정한 연삭조건하에서의 최적 가공 조건을 설정할 수 있음을 확인할 수 있다. 그리고 연삭력의 변화량으로부터 연삭면 형상오차를 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경첨단에너지기계연구센터 지원(과제번호: R12-2003-001-02003-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kovach, J. A., and Malkin, S., 1998, "Thermally Induced Grinding Damage in Superalloy Materials", *CIRP*, Vol. 37, pp. 309~313.
- (2) Okuyama, S., and Kawamura, S., 1979, "Local Thermal Expansion of Workpiece under Grinding", *JSP*, Vol. 45, No. 5, pp. 418~424.
- (3) Nakano, Y., and Shiozaki, S., 1969, "On the Floating Behavior of Surface Grinding Machine Table (3rd Report)-The Effect of the Behavior of

- Tables on the Machining Accuracies”, *JSME*, Vol. 35, No. 269, pp. 225~229.
- (4) Nishihara, T., Okuyama, S., and Kawamura, S., 1988, “Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding - Effect of Bending Caused Grinding Heat”, *JSPE*, Vol. 54, No. 8, pp. 1496~1501.
- (5) Nakano, Y., and Ota, K., 1996, “Analysis of Steady State Thermal Deformations of Workpiece During Surface Grinding Operation”, *JSPE*, Vol. 61, pp. 364~368.
- (6) Okuyama, S., 1998, “Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding”, *JSPE*, Vol. 64, pp. 1496~1501.
- (7) Son, M. H., 1993, *Cutting Mechanism*, Moonundang, pp. 344~354.
- (8) Ru, H. Y., and Lee, K. S., 1994, *Numerical Solution for Mechanical Engineers*, Heichungdang, pp. 245~280.