

# 단속에 따른 Creep Feed 연삭가공 특성 (Characteristics of creep feed grinding in slotted wheel)

이 상철\*, 박 정우(부산대 대학원), 하 만경(부경대), 송 지복(부산대학교 정밀기계공학과)

## ABSTRACT

A geometric error of machine parts is one of the most important factors that affect the accuracy of positioning, generating and measuring for precision machinery. It is known that the thermal deformation of a workpiece during surface grinding is the most important in the geometric error of ground surface. This paper experimentally describes the grinding characteristics of creep-feed grinding. The wheels have 6 slotted pieces in order to compare the grinding temperature with the geometric error.

Keyword : Geometric error(형상오차), slotted wheel(단속휠),  
Grinding temperature(연삭온도), Grinding characteristics(연삭특성)

### 1. 서 론

연삭가공은 주로 다듬질 가공으로 이용이 되어왔으나 최근들어 정도를 유지하면서 능률을 향상시키는 가공방법이 요구되어지고 있다.

고능률 가공법을 크게 두가지로 나누면 고속연삭과 크리프피드연삭으로 나눌수 있는데 60년대 이후 많은 연구가 이루어 지고 있지만 고속연삭에서는 고속모터와 원심파괴가 일어나지 않는 고강성의 휠(CBN, Diamond)이 필요하고 크리프피드(Creep feed) 연삭에서는 절입깊이가 증가함으로 인해서 과도한 연삭열이 발생하여 열손상을 가져오기 때문에 실용화에 어려움이 있다.

크리프피드연삭에서 과도한 열 발생을 억제하기 위해 휠에 홈을 내어 연삭가공을 하는데, 단속휠을 사용하여 크리프피드 연삭을 해도 열 상승을 억제하는데 한계가 있음으로 가공시 발생하는 온도분포를 아는 것이 열손상(형상오차, 버닝, 잔류응력등)을 예측하고 제거하는데 필수적이다.<sup>[1,3,4,5]</sup>

따라서 본 연구에서는 일반휠과 단속휠을 사용하여 공작물 전체의 온도분포와 온도분포에 따른 형상 정도와의 관계를 규명해 보고 다중선형 회귀분석을

가정하여 실험식을 유도해 보고 가공 표면의 상태를 비교해 보고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 형상오차의 요인

평면연삭에서 공작물을 가공할 때, 연삭된 표면의 형상오차에 영향을 주는 요인에는 크게 두 가지로 나눌 수가 있는데, 하나는 공작물을 변형시키거나 억제시키는 요인을 포함하는 그룹이고, 다른 그룹은 연삭시 공작물과 스톨 축 또는 연삭점에서 상대 변위를 일으키는 요인을 포함하는 그룹이다.

전자에 속하는 요인으로는

- ① 국부적인 열 팽창
- ② 열 팽창에 따른 굽힘 변형
- ③ 연삭력에 의한 변형
- ④ 잔류 응력에 의한 변형
- ⑤ 자력(Magnetic Force)에 의한 변형

후자에 속하는 요인으로서는

- ① 테이블의 직선운동 오차
- ② 스톨 축의 탄성휨
- ③ 스톨-공작물간의 접촉휨과 같은 것이 있다.

## 2.2 연삭가공시 열변형의 근사해석

크리프피드 연삭에서는 절입깊이가 증가하기 때문에 연삭 스톨입자와 공작물사이의 간섭 길이가 길어져서 피삭재의 상면과 하면의 온도차에 의한 열응력이 발생하여 공작물에 굽힘 모멘트가 작용하게 된다.

연삭열로 인하여 공작물 초기에 작용하는 굽힘 모멘트  $M$ 이 연삭종료시까지 일정하고 연삭개시점부터 연삭 통과 전까지 공작물의 굽힘 모멘트가 작용한다고 가정하고, Fig. 1에 표시한 임의의 점( $x=a$ )의 바로 위에 연삭점이 있다고 하면 좌표  $x$ 에서의 공작물 중심선의 수직변위  $V(x)$ 에 대하여 다음과 같은 미분 방정식이 성립한다.<sup>[2]</sup>

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (0 \leq x \leq a)$$

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = 0 \quad (a \leq x \leq L)$$

여기서,  $E$  : 종탄성계수  $I$  : 단면 2차 모멘트  
 $M$  : 굽힘 모멘트  $L$  : 공작물 길이  
 윗식을 풀면

$$V(x) = \frac{M}{2EI} \left\{ ax \left( 2 - \frac{a}{L} \right) - x^2 \right\} \quad (0 \leq x \leq a)$$

$$V(x) = \frac{Ma^2}{2EI} \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \quad (a \leq x \leq L)$$

여기에 경계조건,  $x=a$ 에서 식의  $V(x)$ 와 처짐은 각  $dV(x)/dx$ 와 같고, 또한  $V(x=0) = V(x=L) = 0$ 을 만족한다면 스톨 바로 아래의 변위  $V(a)$ 는 다음과 같이 주어진다.

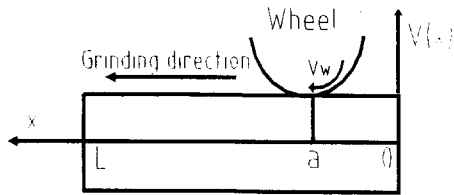


Fig. 1 Coordinates of workpiece and grinding point

$$V(x) = \frac{Ma^2}{2EI} \left( 1 - \frac{a}{L} \right)$$

이때  $V(a)/V(\max)$ 의 비를  $a/L$ 를 이용해서 그리면 Fig. 2와 같이 된다.

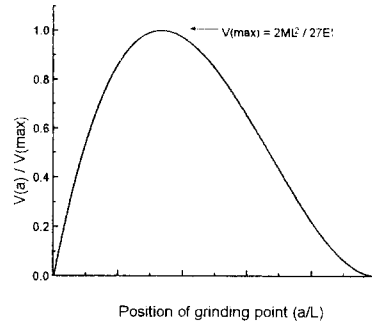


Fig. 2 Geometric error under the grinding point

여기서 최대치는  $a/L$ 이 2/3인 위치에서  $2ML^2/27EI$ 의 값을 가진다는 것을 알수가 있다.

## 3. 실험장치의 구성 및 실험

### 3.1 실험장치 및 방법

다음 Table 2는 연삭실험조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Experimental equipment and grinding condition

Grinding machine	<ul style="list-style-type: none"> <li>Model : HYDRAULIC SURF ACE GRINDING MACHINE</li> <li>Main shaft motor : FELQ-5 1.5kw 2P Yasukawa</li> <li>Wheel speed : 2450 RPM</li> </ul>
Grinding wheel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Type : WA80K7V</li> <li>Shape : 305×30.5×127</li> </ul>
Workpiece	<ul style="list-style-type: none"> <li>Material : STD 11</li> </ul>
Grinding method	<ul style="list-style-type: none"> <li>Up cut &amp; One pass</li> </ul>
Table speed	<ul style="list-style-type: none"> <li>3~9 m/min</li> </ul>
Depth of cut	<ul style="list-style-type: none"> <li>10~35 <math>\mu\text{m}</math></li> </ul>
Dressing	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dresser : Single point diamond</li> <li>Depth of cut : 20 <math>\mu\text{m}</math> × 2회</li> </ul>

스톨은 규격이 305×30.5×127인 WA80K7V를 사용하였으며, 홈의 수를 늘리면 연삭가공시 발생하는 국부적인 열의 해소는 가능하지만 상대적으로 표면 거칠기가 나빠진다는 결론에 근거를 두고 홈의 갯수

를 6개로 가공을 하였다.

단속연삭에서 중요한 인자인 실제 가공시에 접촉하는 부분과 접촉하지 않는, 즉 흠에 해당하는 부분의 비를 단속비( $\gamma$ )라고 하는데 실험에 사용된 단속휠의 단속비는 0.125가 된다.

일반적으로 크리프피드 연삭에서는 습식연삭을 많이 하고 있지만 온도의 분포특성을 알아보기 위해서 건식연삭을 했다.

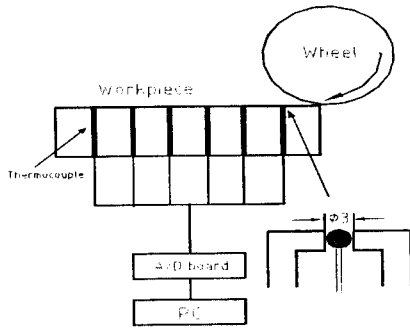


Fig. 3 Experimental set up

Fig. 3는 전체 시스템의 구성도를 나타낸 것으로 105×21×25의 규형강인 STD11에 15mm되는 지점마다  $\phi 3$ 의 CA Type 열전대를 가공면 표면에 용접을 하여 동시에 6개 지점에서 나오는 전압을 DR-12 A/D convertor를 사용하여 데이터를 획득하였다. 또한 형오차는 Rank-Taylor Hobson사의 Tayrond 252를 사용하여 획득한 데이터 값들을 Origin에서 분석을 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 결과 및 고찰

Fig. 4는 이송속도가 4.3(m/min)이고 절입깊이가 20 $\mu$ m인 가공조건에서 시편의 가공시작점으로부터의 6등분 지점들에서 시간에 따른 온도 분포와 중첩된 온도를 보여주고 있으며 이 중첩된 온도값을 2차 근사시킨 식과 값을 보여 주고 있다.

Fig. 5는 같은 가공조건에서의 최대 형상오차가 33.2 $\mu$ m가 나왔으며 이 형상오차 값을 역수로 취한 값들을 그래프로 표현을 하였는데, 여기서 두 그래프의 경향이 일치하는 것을 알 수가 있다.

따라서 온도분포를 실험을 통해서나 모의 실험을 통하여 온도분포를 정확하게 예측하면 형상오

차를 구할 수가 있다는 것을 알 수가 있다.

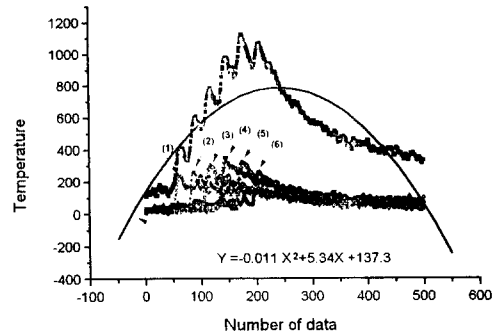


Fig. 4 Distribution of temperature

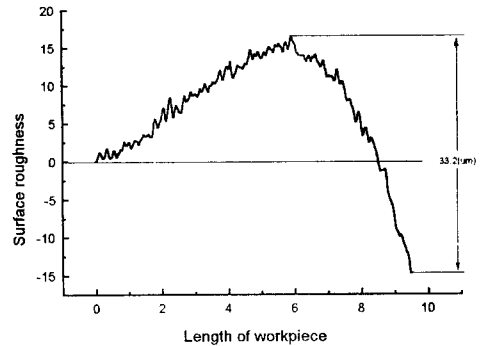


Fig. 5 Surface roughness  
(Feed rate 4.3m/min, Depth of cut 20 $\mu$ m)

Fig. 6은 이송속도와 절입깊이에 따른 온도를 보여주고 있으며 Fig. 7은 같은 가공조건에서의 형상오차를 나타낸 그래프이다. 이 두 그래프를 비교해 보면 같은 경향을 나타내고 있는 것을 알 수가 있다. 이때 발생하는 열은 절입깊이와 공작물 이송속도에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있으며, 가공물의 온도분포를 파악함으로써 형상오차를 예측할 수가 있음을 보여주고 있다.

같은 조건에서 가공할 경우 일반휠을 사용할 때보다 단속휠을 사용할 경우 온도가 감소하고 형상오차가 줄어 든다는 것을 알 수가 있다. 즉 가공시 공기가 직접 냉각을 함으로 온도와 형상오차가 줄어 든다는 결론을 낼 수가 있었다.

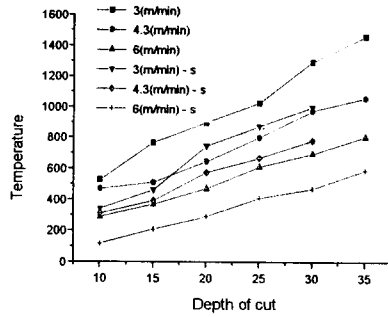


Fig. 6 Temperature in various conditions

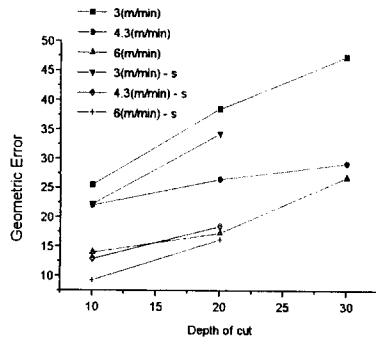


Fig. 7 Geometric error in various conditions

형상오차에 가장 크게 영향을 미치는 것은 연삭시 발생하는 온도이며 이 온도는 절입깊이와 공작물 이송속도에 밀접한 연관이 있다는 것을 밝혔다. 따라서 절입깊이와 공작물 이송속도를 독립변수로 형상오차의 최대치  $V_{(max)}$ 을 종속변수로 한 일반화된 관계식을 만들기 위해 다음과 같은 수학적 모델(다중선형 회귀모형 - multiple linear regression model)을 설정하였다.

$$V_{(max)} = a \times V_w^b \times d^c$$

$$\ln V_{(max)} = \ln a + b \ln V_w + c \ln d$$

여기서,  $a, b, c$  : 계수

$V_w$  : 공작물 이송속도

$d$  : 절입깊이

위의 식에서 각 계수를 구하기 위하여 앞에서 일반회귀와 단속회귀로 실험 결과를 Table 2와 Table

3을 만들어서 표현을 하고 이 데이터들을 바탕으로 회귀분석한 계수  $a, b, c$ 와 모표준편차를 추정하는 추정치( $V_{(max)}$ )는 다음과 같다.

$$V_{(max)} = e^{3.39} \times V_w^{-1.18} \times d^{0.54} \text{-(일반회귀)}$$

$$V_{(max)} = e^{2.34} \times V_w^{-0.15} \times d^{0.28} \text{-(단속회귀)}$$

Table 2 Maxium geometric errors by experiment and estimate

Feed rate	Depth of cut( $\mu\text{m}$ )	Maxium geometric error( $\mu\text{m}$ )	
		Experiment	Estimate
3(m/min)	10	25.5	28.25
	20	38.5	40.1
	30	51.4	51.17
4.3(m/min)	10	22	
	20	26.5	
	30	29.2	
6(m/min)	10	13.98	
	20	17.31	
	30	26.75	

Table 3 Maxium geometric errors by experiment

Feed rate	Depth of cut( $\mu\text{m}$ )	Maxium geometric error( $\mu\text{m}$ )
3(m/min)	10	22.2
	20	34.3
4.3(m/min)	10	9.278
	20	16.18
6(m/min)	10	12.9
	20	18.5

위의 Table 2에서 공작물 이송속도가 3(m/min)에서 왼쪽 값들은 실험을 통해서 획득한 값들이고 오른쪽 값들은 회귀분석한 식에 의한 값들로 분석한 식이 타당하다는 것을 보여주고 있으며 동일 연삭기에서 가공 조건을 알고 있을 경우 형상오차를 예측할 수가 있다.

## 5. 결론

일반적으로 크리프 피드가공에서 가장 문제시 되고 있는 것이 접촉영역이 커짐으로 인한 국부적이 가공열의 상승을 들 수가 있는데, 이 국부적인 고온으로 인하여 큰 형상오차가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 연삭가공시 발생하는 온도를 파악해보고 이 결과와 형상 오차와의 관계를 규명을 하였다.

- ① 최대 형상오차가 연삭개시점부터 2/3지점에서 발생함을 모의 실험과 실험을 통하여 검정을 하였다.
- ② 가공시 발생하는 전체의 온도분포를 실험을 통해서 최대 형상오차가 발생하는 2/3지점에서 온도가 최대가 됨을 파악할 수가 있었다.
- ③ 전체온도분포를 중첩시킨 값을 2차 회귀시킨 값이 형상오차와 유사한 경향을 보인다는 것을 실험을 통하여 알 수가 있었다.
- ④ 단석휠을 사용하면 전체 온도와 형상오차가 감소함을 알 수가 있었다.
- ⑤ 공작물 이송속도와 절입깊이를 독립변수로 하고 최대 형상오차를 종속변수로 하는 다중선형회귀모형(Multiple linear regression model)을 가정하여 실험식을 유도해보고 타당성을 입증 하였다.

#### 참고문헌

1. K. Nakayama, J. Takaji and T. Abe, "Grinding Wheel with Helical Grooves-an Attempt to Improve the Grinding performane", CIRP, No.1, pp.133-183, 1977
2. Shigeki Okuyama, tokuhiko Nishihara, "Study on the Flatness of Work Produced by Surface Grinding", JSPE, 54, pp.1496-1501, 1988
3. Seiki Matsui, " Grinding Characteristic of Segmental Wheel", JSPE, 52, pp.35-41, 1986
4. H. W. Zheng, " A General Thermal Model for Grinding with Slotted or Segmented Wheel", CIRP, Vol.43, No.1, pp.287-290, 1994
5. Robert S. Hahn, " On the Universal Process Parameters Governing the Mutual Maching of Workpiece and Wheel applied to the Creep-Feed Grinding Process", CIRP, Vol.33, 1984, pp.198-192