

전착 CBN 반구형 슷돌에 의한 측면 연삭가공 The Side-Cut Grinding by the Electrodeposited CBN Wheel of a Hemispheric Type

서영일^{*}, 김창수^{*}, 최 환^{**}, 이증찬^{**}, 정선환^{***},

^{*} 금오공과대학교 대학원, ^{**} 금오공과대학교 기계설계공학과, ^{***} 금오공과대학교 생산기계공학과

ABSTRACT

In this paper, a theoretical analysis is presented on the mechanics for the side-cut grinding by electrodeposited CBN wheel of a hemispheric type. Each of the grinding force components is calculated by using the geometrical model. It is also presented that experimental results show grinding forces for grinding variables such as wheel speed, feed speed, depth of cut, and grinding wheel positions. The experimental results are found to be in good agreement with those predicted by the analytical calculation.

Key Words : Side-cut grinding(측면연삭), Electrodeposited CBN wheel of a hemispheric type, (전착 CBN 연삭스틀), Grinding force(연삭저항력), STD-11(합금공구강)

1. 서 론

보통 자유곡면을 갖는 금형의 3차원 가공방법은 먼저 블렌드밀을 통하여 형상가공을 한 후 요구되는 정밀도를 획득하기 위하여 수작업을 통한 연마공정으로 이루어진다. 그러나 이러한 기존의 공정방법은 많은 시간이 소비될 뿐만아니라 고 정밀도 획득 및 고 효율 측면에서 많은 문제점을 안고 있다. 이와같은 문제점을 해결하고, 3차원 금형의 고 정도, 고효율 가공방법의 하나로 머시닝센터를 이용한 연삭가공법이 매우 유용하리라 본다.

본 연구에서는 금형의 3차원 연삭가공에 관한 기초적 가공기술을 확보하기 위하여 금형의 곡면가공에 적용범위가 큰 전착 CBN 반구형 슷돌을 제작하고, 반구형 슷돌을 사용하여 곡면 측면 연삭가공을 행하였을 때 가공조건 및 슷돌의 가공위치 변화에 따른 연삭력을 가공모델을 만들어 이론적으로 해석하였다. 그리고 이론적으로 해석한 연삭력의 타당성 검증을 위하여 Rc 60으로 열처리한 STD-11을 머시닝센터 상에서 가공조건 및 슷돌의 가공위치를 변화시켜가며 곡면 측면 연삭가공을 수행하고, 실험결과로부터 얻은 연삭력의 실험값과 이론값을 비교하였

다. 또한 가공 조건 및 슷돌의 가공위치 변화에 따른 연삭력의 변화를 살펴보았다.

2. 연삭저항력 해석

2.1 가공 모델

Fig. 1은 반구형 슷돌의 형상 및 가공모델에 관해 나타낸 것이다. 그림에서 슷돌의 중심으로부터 임의의 각도 θ_2 에서 θ_1 을 제외한 부분이 공작물을 가공한다고 할 때, 그림에 나타난 방향으로 절입깊이 a (mm)만큼 절입한 경우에 대하여 생각해 본다.

Fig. 1에서 슷돌이 공작물에 접촉하는 면에 있어서의 슷돌 평균주속도 V_{sm} (mm/min)과 공작물과 슷돌의 상부 접촉길이 L_1 (mm), 하부 접촉길이 L_2 (mm)는 슷돌의 회전수 n (rpm), 슷돌 반경 R (mm),

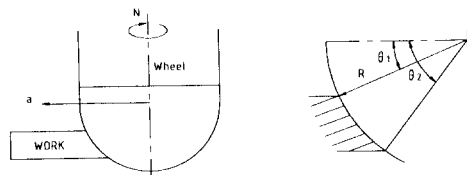


Fig. 1 Grinding Mechanism of hemi-spherical wheel

절입깊이 $a(\text{mm})$ 에 대하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_{sm} = \pi n R (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (1)$$

$$L_1 = (2 a R \cos \theta_1)^{1/2}, L_2 = (2 a R \cos \theta_2)^{1/2} \quad (2)$$

또한 공작물과 숫돌이 접촉하는 면적을 S 라 하면 접촉면적 S 는 아래와 같다.

$$S = \frac{1}{81} a^{1/2} R^{3/2} (\cos^{1/2} \theta_1 + \cos^{1/2} \theta_2) (\theta_2 - \theta_1) \quad (3)$$

여기서 θ_1, θ_2 는 숫돌과 공작물간의 접촉각(Deg)이다.

2.2 입자분포 및 평균입자 절입깊이

연삭저항을 해석하기 위하여 먼저 전착된 반구형 숫돌 표면에 불규칙적으로 분포해 있는 입자의 형상을 평균직경 d_g 의 구형으로 가정하며, G 를 입도번호라 하면

$$d_g = 15 G^{-1} \quad (4)$$

의 관계를 가진다.¹⁾

그리고 숫돌 표면의 절삭입자들이 평균간격 w (mm)로 일정하게 배열되어있다고 가정하면 단위표면적당의 평균 입자수 $N_i = 1/w^2$ 이 되며, $w = 2 d_g$ 로 가정한다면²⁾

$$N_i = 1.1 \times 10^{-3} G^2 \quad (5)$$

이 된다.

다음으로 입자가 공작물에 작용하는 것에 관하여 살펴본다. 전착되어진 실제 숫돌 표면의 입자 돌출 높이의 분포는 상당히 불규칙하므로 표면에 돌출된 입자에 관해 아래와 같이 가정을 한다.

(1) 입자의 돌출 높이는 모두 균일하며 평균적으로 같은 작용을 한다.

(2) 입자의 절입깊이는 작용면의 수직방향으로 작용한다.

(3) 입자의 마모는 고려하지 않는다.

Fig. 1에서 절삭면(숫돌각 $\theta_2 - \theta_1$)에 작용하는 입자의 최대 절입깊이 g (mm)은 숫돌의 평균주속도 V_{sm} (mm/min)과 공작물 이송속도 v_f (mm/min), 절입깊이 a (mm)에 대해

$$g = \frac{v_f}{V_s} C_i \sqrt{\frac{a}{2R}} (\cos^{-1/2} \theta_1 + \cos^{-1/2} \theta_2) \quad (6)$$

의 관계가 있다.³⁾ 여기서 C_i 는 연속절삭날 평균간격이며, 이값은 절삭입자가 평균간격 w 로 규칙적으로

배열되어 있고, 입자간의 평균절삭폭을 W_0 라고 하여 $W_0 = d_g/2$ 로 가정한다면⁴⁾ 식 (4)로부터 다음과 같이 된다.

$$C_i = \frac{W_0^2}{W_0} = 120 G^{-1} \quad (7)$$

따라서 식 (4), (6), (7)로 부터 입자의 최대 절입깊이 g 은 아래와 같이 구해진다.

$$g = 84.85 \frac{v_f}{GV_{sm}} \sqrt{\frac{a}{R}} (\cos^{-1/2} \theta_1 + \cos^{-1/2} \theta_2) \quad (8)$$

2.3 하나의 입자에 작용하는 연삭력

실제 연삭입자의 형상은 상당히 불규칙적이지만 이론해석의 편리성을 위해 Fig. 2와 같이 구형으로 가정하여 생각한다. Fig. 2는 구형으로 가정한 하나의 입자에 작용하는 연삭저항력에 관한 모델이다.

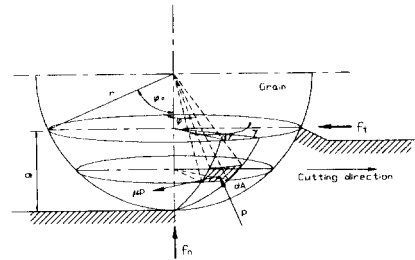


Fig. 2 Cutting model of a single grain

일반적으로 1개의 입자에 작용하는 수평연삭력 f_t 는 공작물을 절삭하는데 소요되는 힘과 입자와 공작물간의 마찰에 기인되는 힘의 총화로 생각한다.⁵⁾

Fig. 2에 있어서 구형 절삭입자에 작용하는 힘의 평형을 고려하면, 접선력 f_t 와 법선력 f_n 은 아래와 같이 구해진다.

$$f_t = p^2 (\varphi_0 - \frac{1}{2} \sin 2\varphi_0) + 2\mu pr^2 (1 - \cos \varphi_0) \quad (11)$$

$$f_n = \frac{\pi}{2} pr^2 \sin^2 \varphi_0 \quad (12)$$

여기서 p 는 면압력(N/mm²), μ 는 마찰계수이며, 절삭입자와 공작물간의 접촉부의 경사각(rad) φ_0 는 식 (4), (8)을 사용하면 아래와 같다.

$$\varphi_0 = 2\sqrt{\frac{g_m}{d_g}} \quad (13)$$

$$= 4.76\sqrt{\frac{v_f}{V_{sm}}} a^{1/4} R^{-1/4} (\cos^{-1/2} \theta_1 + \cos^{-1/2} \theta_2)^{1/2}$$

2.4 연삭력

다음으로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 절삭면($\theta_2 - \theta_1$)에 있어서 하나의 입자에 작용하는 연삭력 f_t , f_n 를 X, Y, Z축 방향으로 변환하면 각각 축 방향의 연삭력 f_x , f_y , f_z 는 근사적으로 아래와 같이 된다. 단, 여기서 숫돌의 가공 회전각 α 는 숫돌의 절입깊이에 비해 매우 작기 때문에 $\alpha \approx 0$ 로 가정한다.

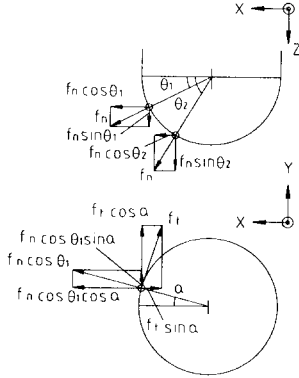


Fig. 3 3-component of grinding forces

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{1}{2} f_n (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \\ f_y &= f_t \\ f_z &= \frac{1}{2} f_n (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 X, Y, Z축 방향의 연삭력 F_x , F_y , F_z 는 식 (3), (5), (14)로부터 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} F_x &= f_n \cdot \zeta \cdot (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \\ F_y &= f_t \cdot \zeta \\ F_z &= f_n \cdot \zeta \cdot (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$$\zeta = 6.8 \times 10^{-6} a^{1/2} G^2 R^{3/2} (\theta_2 - \theta_1) (\cos^{1/2} \theta_1 + \cos^{1/2} \theta_2)$$

이다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 숫돌 및 공작물

금형의 곡면가공에 대한 기초적 연구의 일환으로 먼저 곡면 측면 연삭가공을 위해 Fig. 4와 같이 숫돌 본체(Shank)의 철계 환봉 끝을 반구형($\phi 25$ mm)으로 정밀가공하여 제작하고, 그 가공부 위에

CBN 입자(입도 #140)를 1층만 니켈도금으로 전착하였다. 이와같이 제작한 전착 CBN 반구형 연삭숫돌은 숫돌의 형상이 반 구형(Hemispheric type)이기 때문에 숫돌의 가공점의 변화에 따라 연삭특성도 변하게 된다. 특히 숫돌의 저면부에서는 숫돌 주속도가 영(Zero)이 되어 만약 숫돌 저면으로 가공하게 되면 큰 저항력이 발생하여 연삭이 불가능하게 되므로 숫돌 밑부분에 임의의 구멍($\phi 6$ mm)을 파서 이와같은 문제점을 방지하였다.

실험에 사용된 공작물은 금형 재료로 널리 사용되고 있는 STD-11을 길이 70 mm, 폭 40 mm, 높이 3 mm로 제작하고, 경도 Rc 60으로 열처리하였다. 또한 곡면 측면 가공시 숫돌의 가공위치에 따른 연삭력의 변화를 살펴보기 위해 Fig. 4와 같이 숫돌 3부분의 각각의 접촉 위치에 대한 곡률을 블엔드밀을 사용하여 초기 형상가공을 하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 전착 반구형 숫돌의 형상 및 측면가공에 있어서 숫돌의 가공위치(Positions)를 각각 나타낸 것이다.

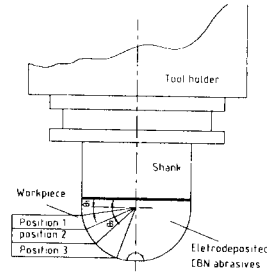


Fig 4. Grinding positions of wheel

3.2 실험방법

전착 CBN 반구형 연삭숫돌을 사용하여 공작물의 곡면 측면 연삭가공시 발생하는 연삭력을 측정하기 위하여 Table 1의 실험조건으로 실험을 수행하였다. 실험기계는 수직형 머시닝센터(화천기계, ECOMIL 35V, 75kW)를 사용하였으며, 연삭력의 측정을 위해 Fig. 5와 같이 압전형 공구동력계(Kistler, 9257B)를 머시닝센터 테이블 위에 설치하고, 그 위에 공작물을 고정된 후 실험조건에 따라 습식 상향 곡면 측면 연삭가공을 행하였다. 가공시에 발생하는 각 축방향의 연삭저항력(F_x , F_y , F_z)의 신호는 공구동력계를 통하여 다채널 증폭기(Kistler, 5019A)에서 증폭된 후 아날로그-디지털변환기(IOtech, DaqBook)를 거쳐 개인용 컴퓨터(PC)로 전송되며 이렇게 전송된 연삭력의 데이터는 PC의 Grinding S/W를 통해 처리하였다. Fig. 5에 실험장치의 개요를, Table 1에 본 실험의 실험조건을 각각 나타내었다.

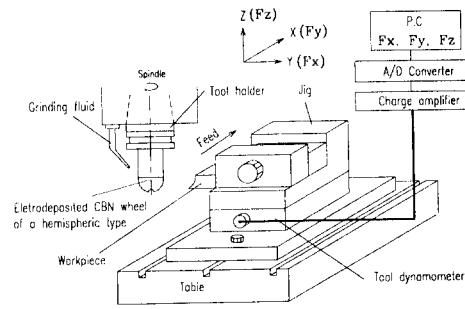


Fig. 5 Experimental setting

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	Vertical type Machining Center (ECOMIL, 75kW)		
Wheel speeds (m/min, rpm)	118(1500rpm)~236(3000rpm)		
Table speeds (mm/min)	80, 120, 160, 200		
Depth of cut (μm)	20, 30, 40		
Position ($\theta_1^\circ \sim \theta_2^\circ$)	1	2	3
	4.6 ~ 19	19 ~ 34.8	34.8 ~ 54.5
Grinding fluid	Syntilo-9954(Castrol, 40:1)		

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 6 ~ 8은 Table 1에 나타낸 실험조건에 의해 실험한 결과이며, 그림에서 파선은 식 (15)를 이용한 계산결과를 나타낸 것이다. 이론식의 계산에 필요한 마찰계수 μ 는 0.6⁶⁾으로 하였으며, 면압력(p)은 측정된 연삭력들로부터 구하여 1700 N/mm²으로 하였다.

Fig. 6은 절입깊이를 30 μm , 이송속도를 80 mm/min으로 한 경우에 있어서 스톨의 가공위치들의 변화에 따른 스톨회전수와 연삭력(Fx, Fy, Fz)과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 연삭력 Fx, Fy, Fz는 스톨 회전수가 증가함에 따라서 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 스톨의 가공위치에 따라서도 동일한 경향을 나타내었다. 이러한 경향들은 식 (1), (8)에서 스톨의 회전수(n)와 입자의 최대 절입깊이(g)가 서로 반비례하기 때문이다. 또한 그림에서와 같이 연삭력을 이론적으로 계산한 값과 실험결과 값을 비교하면 상당히 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 스톨의 가공위치를 $\theta_1=19^\circ$, $\theta_2=34.8^\circ$ 로 하고, 스톨 회전수를 3000 rpm으로 한 경우에 있

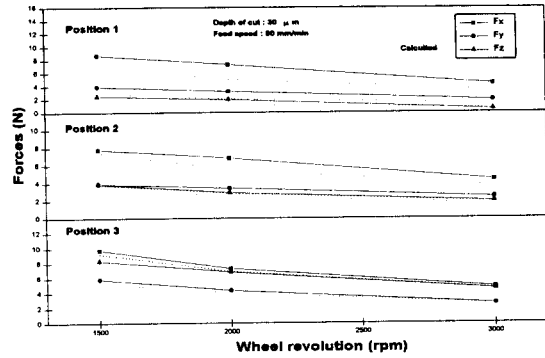


Fig. 6 Forces versus wheel revolution

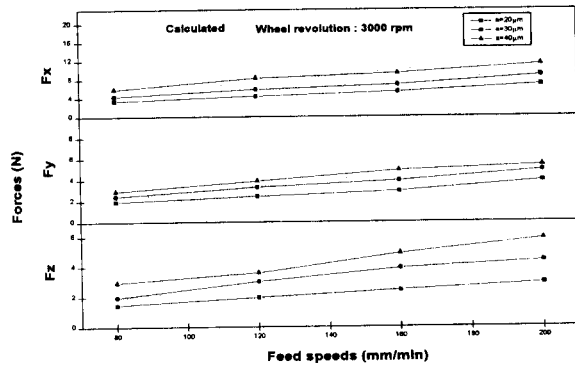


Fig. 7 Forces versus feed speeds

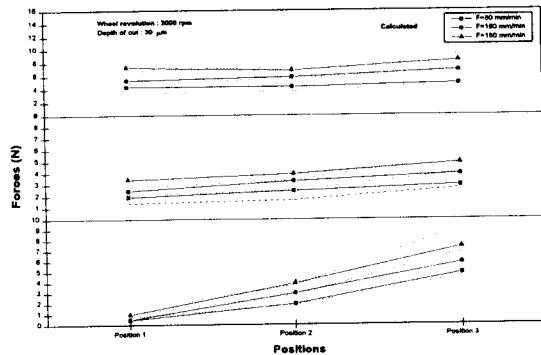


Fig. 8 Forces versus positions

어서 절입깊이의 변화에 따른 이송속도와 연삭력과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 연삭력 Fx, Fy, Fz는 이송속도의 증가와 절입깊이의 증가에 따라서 모두 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 연삭력의 이론값과 실험값의 비교에 있어서도 또한 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 8은 스톨의 회전수를 3000 rpm, 절입깊이를 30 μm , 이송속도를 80, 120, 160 mm/min로 한 경우에 있어 스톨의 가공위치의 변화에 따른 연삭력의 변화를 살펴 본 결과이다. 그림에서 스톨의 가공위

치가 1에서 3으로 변화함에 따라 접선 연삭력 성분인 F_y 의 경우는 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 법선연삭력의 분력인 F_x 와 F_z 의 경우에 있어서 F_x 는 소폭으로 증가하는 반면 F_z 의 경우는 큰 폭으로 증가 함을 알 수 있다. 따라서 법선 연삭력의 경우는 F_x 성분 보다는 F_z 성분의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

전착 CBN 반구형 연삭숫돌을 사용하여 금형의 곡면 측면가공을 가공조건 및 숫돌의 가공위치에 대하여 각 축 방향의 연삭력 F_x , F_y , F_z 을 이론적으로 해석하고, 실제 STD-11 (Rc, 60)을 가공하여 얻은 실험값과 비교 한 결과 어느 경우에 있어서나 실험값과 이론값이 상당히 잘 일치한 결과를 보였다. 따라서 연삭력에 대한 이론식의 타당성이 검증되었다. 실험 조건에 따른 연삭력의 변화를 살펴 본 결과 숫돌의 회전수 증가에 따라서 연삭력은 모두 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 이송속도 및 절입깊이의 증가에 대해서는 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 숫돌의 가공위치의 변화에 대해서는 접선 연삭력 F_y 는 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 법선 연삭력의 성분인 F_x 와 F_z 는 F_x 는 소폭으로 F_z 는 큰 폭으로 증가하므로 법선 연삭력은 F_x 보다는 F_z 의 영향이 크게 작용하였다.

참고문헌

- 1) Malkin, S., 'Grinding Technology', Ellis Horwood, 1989, p. 20.
- 2) 喜田義宏, 崔 桓, 川口格, 中尾傳, 'MCによるセラミック加工, 精密工學會誌, vol. 59, no. 10, 1993, p. 1683
- 3) 臼井英治, '切削. 研削 加工學 (下)', 洪立出版株式會社, 1971, p. 30.
- 4) Saini D. P. and Wager J. G : Annals of the CIRP Vol. 31/1, 1982, p. 215.
- 5) 松井正己, 平面の超仕上に關する研究 (第3報), 精密機械, 昭和30年 5月7日, p. 477.
- 6) 松尾哲夫, 岡村達生, '超砥粒による單粒二次元切削 (第1報), JSPE, vol. 59, no. 7, p. 1175.