

머시닝센터를 이용한 평면 연삭가공에 관한 연구(II)

- 연삭열에 관하여 -

이승만*(금오공대 대학원 기계설계공학과), 최 환, 이종찬, 정선환(금오공대 기계공학부)

A Study on the Surface Grinding using the Machining Center (II)

S. M. Lee (Dept. of Eng. Sci. & Mech., KNUT),
H. Choi, J. C. Lee, S. H. Cheong (Dept. of Mech. Eng., KNUT)

ABSTRACT

Temperature generated in the workpiece during grinding process can cause thermal damages. Therefore it is important to understand surface temperature generated during grinding process. In this paper, a theoretical and experimental investigation were performed for the grinding temperature. Grinding experiments were performed in machining center using vitrified bonded CBN cup-type wheel. The surface temperature was measured using thermocouple and calculated through a model of the partition of energy between wheel and workpiece. The residual stress and hardness of ground surface were measured. The experimental results indicate that the surface temperature was in good agreement with theoretical ones. Residual stress and hardness of ground surface were more affected by the change of table speed than the depth of cut.

Key Words : Surface temperature (표면온도), Partition of energy (에너지 유입비), Vitrified bonded CBN cup-type wheel (비트리아이드 CBN 컵형 휠)

1. 서론

연삭 과정에서 발생하는 연삭열은 고정밀도를 요하는 기계부품에 영향을주어 제품의 형상이나 정밀도(치수)를 저하시키고, 완제품의 표면에 금속 조직이나 경도 등을 변화시켜서 품질 성능을 저하시킨다. 또한 발생하는 연삭열이 심한(많을) 경우에는 공작물이 과도하게 과열되어 누름 현상이 생겨 연삭작업을 계속하기 곤란하므로 연삭열에 의한 공작물의 온도를 아는 것은 매우 중요하다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 머시닝센터에서 컵형 슷들을 이용하여 평면 연삭가공을 하였을 경우 공작물의 표면에 발생하는 표면온도를 이론적으로 해석하였고, 연삭열의 공작물로의 유입비율을 파악하기 위하여 모델을 수립하여 연삭열의 공작물로의 유입비율을 구하였다. 그리고 컵형 비트리아이드 CBN 슷들을 사용하여 머시닝센터에서 가공조건을 변화시키면서 평면 연삭가공 실험을 하였으며, 연삭력과 공작물의 표면온도를 측정하였고, 공작물 표면온도의 실험 결과와 이론해석을 비교 검토하였다.

또한 공작물의 경도 및 잔류응력을 측정하여 열로 인한 공작물의 손상 정도를 살펴보았다.

2. 연삭열의 해석

2.1 공작물 표면온도

평면 연삭가공시 공작물의 표면 온도를 해석하기 위하여 Jeager의 Moving heat source이론을 이용하면 반무한체 표면을 길이 $2l$ 인 슬라이더(Slider)가 단위시간, 단위면적당 q cal의 열량을 내면서 v 의 속도로 이동할 때, 마찰면(표면)의 온도는 Jeager의 일반식으로 다음과 같다.²⁾

$$\theta = \frac{2qK}{\pi k v} \int_{x-L}^{x+L} e^{-u} K_0 (Z^2 + u^2)^{1/2} du \quad (1)$$

여기서 본 연구와 같이 무차원 길이 $L < 0.1$ 일 때 공작물 표면의 온도(θ_s)는 다음과 같다.

$$\theta_s = \frac{4qK}{\pi k v_w} (-2.303L \log_{10} L + 1.116L) \\ = \frac{4F_t R_w V_s K}{\pi k v_w l_c b} (-2.303L \log_{10} L + 1.116L) \quad (2)$$

여기서 F_t 는 접선연삭력(N), R_w 는 공작물로의 열의 유입비율(%), V_s 는 휠 주속도(m/s), K 는 열확산 계수 (m^2/s), v_w 는 공작물의 이송속도(m/s), l_c 는 접촉호의 길이(m), b 는 공작물의 폭(m), L 은 무차원 길이 $v_w l_c / 4K$ 을 각각 나타낸다.

2.2 연삭열의 공작물로의 유입비율

연삭가공은 매우 짧은 가공시간동안에 스톨과 공작물간의 접촉, 마찰, 소성변형, 전단변형과 같은 복합적인 변형거동을 갖고 있으며, 연삭가공에 소요되는 연삭에너지의 대부분이 열로 변환되어서 칩, 스톨, 공작물로 전달된다. 이것들 중 칩으로 유입되는 에너지는 전체 연삭 에너지중에서 아주 작기 때문에²⁾ 본 연구에서는 평면 연삭가공시 발생하는 연삭열이 공작물과 휠로 전달된다는 가정하에 Fig. 1과 같은 모델을 수립하여 에너지 유입비율을 해석하였다.

Fig. 1에서 윗면은 연삭휠, 아랫면은 공작물이며 평면 연삭시 전체 연삭에너지에서 R_w 만큼이 공작물로 유입된다고 하고, 휠로 빠져나가는 에너지비율은 $(1 - R_w)$ 가 된다고 가정하면 공작물로 유입되는 에너지비율 R_w 를 다음 식으로 구할수 있다.³⁾

$$R_w = 1/[1 + \{ (k\rho c)_s / (k\rho c)_w \}^{0.5}] \quad (3)$$

여기서 아래첨자 s 와 w 는 각각 휠과 공작물을 나타내고, k 는 열전도 계수 ($W/m^{\circ}K$), ρ 는 밀도 (kg/m^3), c 는 비열 ($J/(kg^{\circ}K)$)을 각각 나타낸다.

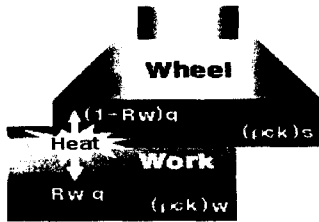


Fig. 1 Model for energy partition

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	Vertical type machining center (ECOMIL-43V, 7.5kW)
Wheel (mm)	CBN 200 100 G V D× D ₁ × B× H : 60× 50× 5× 5
Quill (mm)	Diameter : ø 25 Length : 90
Workpiece (mm)	5B × 16H × 5.5L
Wheel speed (m/min, rpm)	3000rpm, 565m/min
Table speed (mm/min)	10, 50, 100 ..
Depth of cut (μm)	10, 30, 50
Dressing condition	Wheel speed : 1000 rpm Feed speed : 100 mm/min Depth of cut : 5μm × 2pass Dresser : Single-point diamond Fluid : Syntilo-9954(Castrol, 40:1)
Grinding type	Plunge & Dry

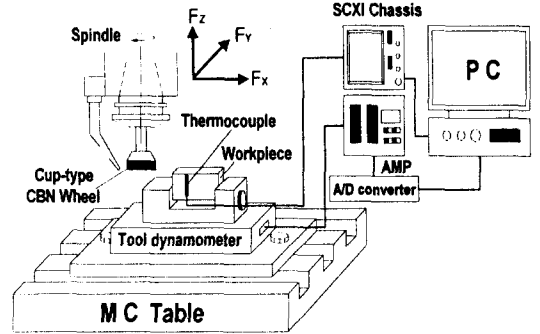


Fig. 2 Schematic illustration of experimental set-up

3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 휠은 비트리파이드 CBN 컵형 휠로써, 입도 #200, 집중도 100, 결합도 G이다. CBN 휠의 크기는 외경(D=ø 60mm), 내경(D₁=ø 50 mm), 폭(B=5mm), 높이(H=5mm)인 컵형스톨로, 45° 테이퍼 알루미늄 대(臺)에 부착하여 사용하였으며, 직경 ø 25mm, 길이 90mm로 정밀하게 가공된 퀴ل 축에 부착하여 실험을 수행하였다. 공작물은 금형 재료로 널리 사용되고 있는 합금공구강 STD-11을 길이 5.5mm, 폭 5mm, 높이 16mm로 제작한 후 경도 HRC 60으로 열처리하였다. 실험에 사용된 공작기계는 수직형 머시닝센터(화천기계, ECOMIL 43V, 7.5kW)를 사용하였으며, 실험방법은 Table 1의 실험조건에 따라 Z축 방향으로 절입깊이를 설정한 후 NC 프로그램에 의해 X축방향으로 이송속도(V_t)를 변화시켜 가며, 건식 상향 연삭가공을 수행하였다. 휠의 진원을 형성하기 위하여 단석 다이아몬드 드레싱(3/4")를 사용하여 트루잉을 실시하였으며, Table 1의 실험 조건으로 매 실험마다 드레싱을 행하였다.

Fig. 2는 본 실험의 실험장치의 개요를, Table 1에는 실험조건을 각각 나타내었다.

3.1 연삭력 및 공작물 표면온도의 측정

평면 연삭가공시 발생하는 휠의 이송방향의 연삭력(F_x)과 접선방향 연삭력(F_y) 및 법선방향의 연삭력(F_z)을 측정하기 위하여 머시닝센터 테이블 위에 공구동력계를 설치하였으며, 공구동력계에서 발생된 신호는 다채널 증폭기(Kistler, 5019A)에서 증폭된 후 아날로그-디지털 변환기(IOtech, DaqBook)를 거쳐 개인용 컴퓨터로 전송되고, 이렇게 전송된 연삭력의 데이터를 Grinding S/W를 이용하여 분석하였다. 평면 연삭가공시 공작물의 표면에 발생하는 표면온도를 측정하기 위하여 공작물의 밀면에서 표면근방까지 직경 ø 3mm의 구멍을 뚫고 그 구멍으로 직경 ø 2.8mm의 열전대를 뚫린 구멍에 삽입하여 에폭시(본드)로

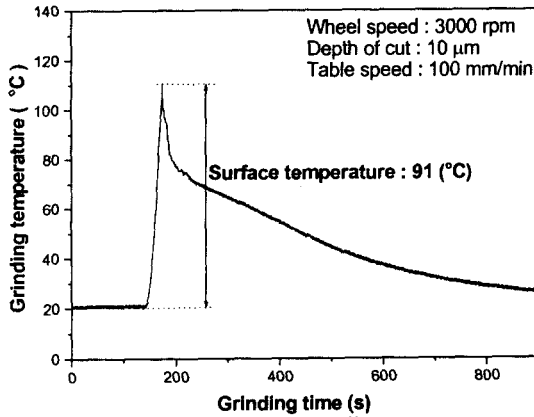


Fig. 3 A measurement of grinding temperature

단단히 고정하였다. 사용된 열전대는 K-type 크롬-알 루멜(30개이지선)로 측정 온도범위가 -165 ~ 1260°C 이고 각 열전대 소선의 직경은 0.254mm이다. 열전대 에서 발생된 신호는 SCXI Chassis를 거쳐 증폭된 후 아날로그/디지털 변환기(Daqboard)에서 디지털화 하여 개인용 컴퓨터로 전송하고, 이렇게 전송된 표면온도의 데이터는 Labview S/W를 통해 분석하였다.

Fig. 3은 머시닝센터를 이용한 평면 연삭가공시 공작물 표면에 발생하는 온도를 열전대를 이용하여 측정 한 일 예를 나타낸 것이다. 실험조건은 휠의 주속도를 3000 rpm, 공작물의 이송속도를 100 mm/min, 절입 깊이를 10 μ m으로 1 pass 평면 연삭가공한 경우이다. 실험 결과 공작물의 표면에 발생하는 표면온도는 91°C로 측정되었다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 연삭력

머시닝센터를 이용한 평면연삭가공을 수행하는데 있어서 가공조건에 따른 연삭력의 변화를 살펴 보기 위하여 휠의 주속도를 3000 rpm으로 일정하게 유지시키고, 휠의 절입깊이와 이송속도의 변화에 따른 연삭력(F_x , F_y , F_z)의 변화를 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3과 4에서 연삭력은 휠의 절입깊이와 이송속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 이송속도 및 절입깊이가 증가할수록 입자의 최대절입깊이가 증가하므로 연삭력이 증가하는 것으로 사료된다.

4.2 공작물의 표면온도

Fig. 5와 6은 휠의 주속도를 3000 rpm으로 일정 하게 유지시키고, 절입깊이 및 이송속도의 변화에 따른 공작물의 표면에 발생하는 온도를 이론식 (2) 로 구한 결과와 실험으로부터 측정된 결과 값을 나타내었다. 이론값에 필요한 공작물과 CBN입자의 물

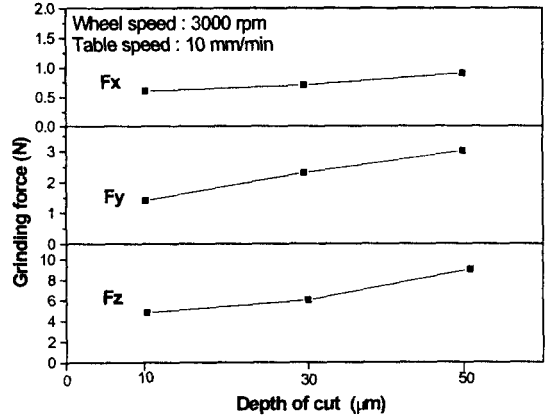


Fig. 4 Grinding force versus depth of cut

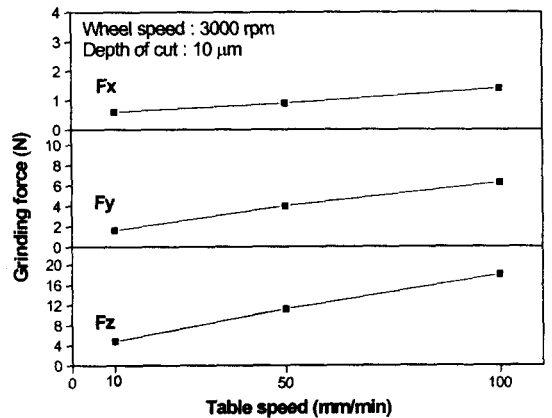


Fig. 5 Grinding force versus table speed

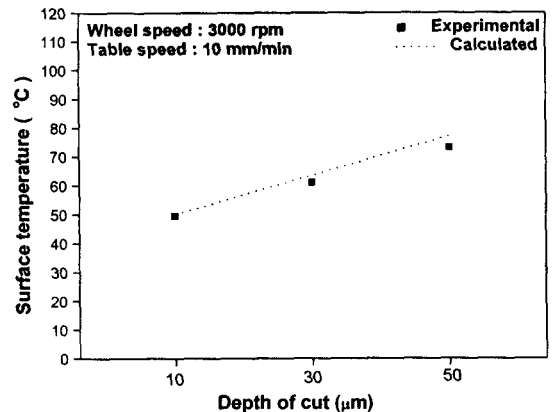


Fig. 6 Surface temperature versus depth of cut

Table 2 Physical properties of wheel and workpiece

	ρ (kg/m ³)	C J/(kgk)	k w/(mk)	α (m ² /s)
CBN	3480	506	240	1.36×10^{-4}
Workpiece	7700	527	42.2	1.04×10^{-5}

성치는 Table 2⁴)에 나타내었으며, 식 (3)으로부터 구 한 공작물로의 유입비율 $R_w = 0.39$ 로 나타났다.

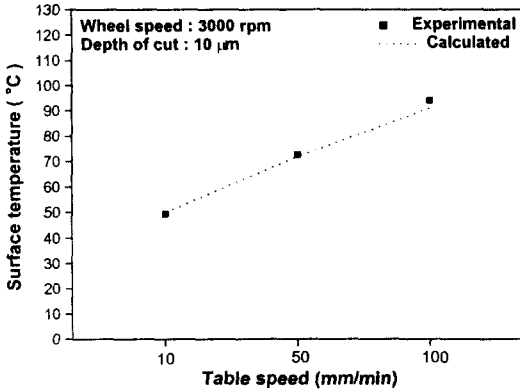


Fig. 7 Surface temperature versus table speed

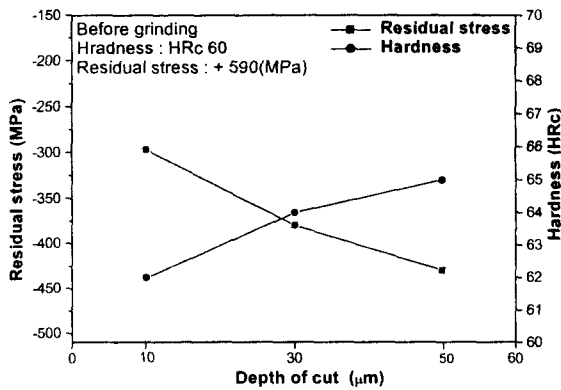


Fig. 8 Residual stress and hardness versus depth of cut.

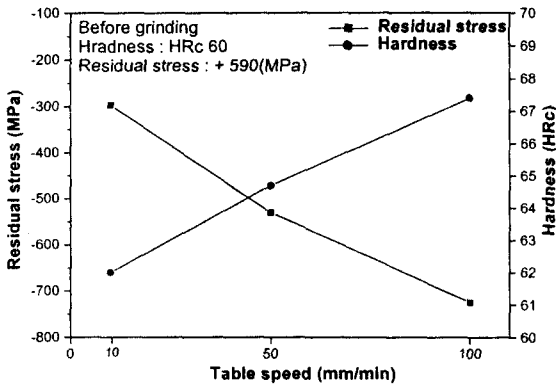


Fig. 9 Residual stress and hardness versus table speed.

접선연삭력 F_t 는 본 연구의 경우 F_y 에 해당하므로 F_y 를 사용하였다. Fig. 5와 6에서 공작물의 표면에 발생하는 표면온도는 절입깊이와 이송속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

이러한 이유는 이송속도 및 절입깊이가 증가할수록 접선연삭력(F_y)이 증가하여 표면온도가 증가하는 것으로 생각된다. 또한 공작물의 표면에 발생하는 표면온도를 이론적으로 계산한 값과 실험결과 값을 비교하면 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 7과 8에는 공작물 표면의 손상정도를 살펴보기 위하여 X-Ray 회절기(X-Ray Diffractometer)를 이용한 잔류응력의 측정과, 얇은 박판의 경도측정에 사용되는 마이크로 경도계(SHIMADZU)를 사용하여 경도계의 다이아몬드 압자를 가공표면으로 부터 $5\mu\text{m}$ 압입하여 표면경도를 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 7과 8에서 가공면의 압축 잔류응력과 경도는 절입깊이 및 이송속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었고, 절입깊이의 영향 보다는 이송속도의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었다.

따라서 본 실험의 범위에서는 이송속도를 작게 하고, 절입깊이를 크게하여 가공하는 것이 공작물 가공면의 손상 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 머시닝센터를 이용한 평면 연삭가공 시 공작물의 표면에 발생하는 표면온도와 연삭열의 공작물로의 유입비율을 이론적으로 구하고, 실험을 통하여 연삭력 및 표면온도를 측정하여 실험 결과와 이론값을 비교 검토하였으며, 공작물 표면의 손상 정도를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연삭력과 공작물의 표면온도는 휠의 절입깊이와 이송속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

(2) 연삭열의 공작물로의 유입비율 R_w 는 식(3)에 의해 39%로 나타났다.

(3) 실험을 통하여 측정된 공작물 표면의 온도와 이론식으로 구한 공작물의 표면온도를 비교한 결과 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다.

(4) 가공면의 압축 잔류응력과 경도는 절입깊이 및 이송속도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었고, 절입깊이의 영향 보다는 이송속도의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있었으며, 본 실험의 범위에서는 이송속도를 작게 하는 반면, 절입깊이를 크게하여 가공하는 것이 공작물 가공면의 손상 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) 김남경, "범용연삭기에서의 고정밀 및 고능률 가공에 관한 연구", 부산대학교 기계공학과, 1992
- 2) 孫明煥, "切削加工論", 文運堂, pp. 52 ~ 63, 1992
- 3) S. Ramanath, M. C. Shaw, "Abrasive Grain Temperature at the Beginning of a Cut in Fine Grinding", *Journal of Engineering for Industry*, pp. 15 ~ 18, 1988
- 4) C. E. Black, B. Mills, "A Simplified Approach to Control of Thermal Damage in Grinding", *Annals of the CIRP*, pp. 299 ~ 302, 1966
- 5) S. Malkin, "Thermal Aspects of Grinding", *Transactions of the ASME*, pp. 1184 ~ 1191, 1974