

평면 연삭에서의 연삭 슷돌 마모 추정 및 실험적 검증

김현수*(금오공과대 대학원), 주광훈(금오공과대 대학원), 홍성욱(금오공과대),
이응숙(한국기계연구원), 박천홍(한국기계연구원)

Estimation and experimental verification of grinding wheel wear in surface grinding process

H.S. Kim *(Graduate School, KNUT), K.H. Ju(Graduate School, KNUT), S.W. Hong (KNUT),
E.S. Lee(KIMM) and C.H. Park (KIMM)

ABSTRACT

This paper deals with the theoretical estimation and its experimental verification of grinding wheel wear in surface grinding process. A theoretical formulation is provided to predict the grinding wheel wear in surface grinding. The associated surface roughness and grinding force are also investigated both theoretically and experimentally. Through a series of simulations and experiments, it is shown that the predictions are in good agreement with the experimental results.

Key Words : Surface Grinding(평면 연삭), Grinding Wheel Wear(연삭 슷돌 마모), Surface roughness(표면 거칠기), Grinding Force(연삭력)

1. 서론

연삭 가공은 형상 및 치수 정밀도가 높고 표면의 품질이 높아 거의 모든 기계 가공의 마무리 공정을 이루고 있다. 따라서 연삭 가공의 질은 제품의 정밀도와 성능에 그대로 반영된다. 연삭 공정은 가공 원리상으로 다른 절삭 공정에 비해 공구의 마모 진행 정도가 빠르며, 가공 중에 발생하는 슷돌의 마모는 기계적으로 인가된 겹보기 절입량(Depth of cut)보다 실 절입량을 작게 하여 연삭비를 감소시키므로 가공 오차의 원인이 되고 있다. 최근에는 이와 같은 측면을 고려하여 연삭 공정 중 발생하는 연삭 슷돌의 마모를 측정함으로써 연삭 정밀도를 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

연삭 슷돌 마모에 대한 정확한 평가는 작업 효율을 증가시킬 뿐만 아니라 슷돌 마모량 보정에 의해 연삭 정밀도를 크게 개선할 수 있다. 그리고 연삭 슷돌 마모량을 평가할 수 있다면, 정확한 데이터 없이 경험에 의존하여 이루어지는 드레싱 작업에 대해 적절한 작업 시점을 설정해 줄 수 있을 것으로 기대

된다. 본 연구에서는 평면 연삭 공정에서 발생하는 연삭 슷돌의 마모량을 평가하기 위한 이론식을 도입하였다. 여기서는 최근 원통 연삭을 중심으로 유도되어 그 적합성이 입증된 관련식[2-4]을 평면 연삭의 경우로 확대 적용하였다. 제안된 식의 검증을 위해 플런지 연삭 공정에서 발생하는 연삭 슷돌 마모량을 측정하여 이론적인 추정치와 비교 분석하였다. 이론과 실험의 비교를 통해 제안된 식이 실제의 경우를 잘 반영하고 있음을 확인하였다.

2. 연삭 공정의 모델링

2.1 연삭 슷돌의 수치화

연삭 슷돌의 특성은 입자의 크기와 결합 강도에 의해 많은 영향을 받는다. 입자의 크기는 입도로 나타내는데 이는 입자를 분류할 때 사용되는 그물망의 눈의 수 (가로, 세로 1 inch)로 표시한다. 따라서, 슷돌의 입도로부터 슷돌입자의 평균직경을 구할 수 있는데 다음 식은 본 연구에서 고려된 입도 범위에서의 슷돌 입자의 평균직경을 제시하고 있다[2].

$$D_g = 48600 \times G_s^{-1.29} \quad (\#150\text{--}\#30 \text{ 구간, } \mu\text{m}) \quad (1)$$

숫들의 결합강도는 연삭입자의 경도 및 인성, 그리고 지립을 지지하는 결합제의 지지력과 강도에 직접적으로 영향을 받는다. 결합도는 연삭숫들 측면에 직각으로 뾰족한 원통 형상의 비트를 축방향으로 하중을 주면서 120도 회전시켜 비트의 박힌 깊이를 측정하며, 이에 따라서 결합도 G_b 를 연한 결합도 A 부터 단단한 결합도 Z 까지로 표시한다(KS L 6501). 결합도를 수치적으로 나타내기 위해, 편의상 결합도 기호에 자연수를 인가하여 A=1, B=2, ..G=7..R=18 로 나타낸다.

2.2 드레싱에 의한 연삭 숫들의 특성

드레싱에 의해 다듬어진 숫들의 초기 절인수 C_0 (개/m)는 기본적으로 평균직경 $D_g(\mu m)$ 의 음의 지수함수로 표시되고, 또한 숫들 입자의 초기 마모면 길이 W_0 는 평균직경 D_g 의 양의 지수함수로 나타나며, 여기에 드레싱 조건 및 숫들의 결합도에 의한 보정계수를 곱한 것으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다[4].

$$C_0 = (15922D_g^{-0.5}) \cdot G_r^{0.33} \cdot E_d \cdot E_g \quad (2)$$

$$W_0 = (0.00389D_g^{0.44}) \cdot E_d \cdot E_g$$

G_r 은 지립율(0~1)이고, E_d 는 드레싱의 효과를 나타내며 드레싱의 능력과 관련된 것으로 드레싱 깊이, 이송속도, 드레서의 형태, 드레서 날끝의 예리함에 따라 0.5~1.5의 범위의 값을 갖는다. 그리고, E_g 는 결합도가 미치는 영향을 나타낸다. 초기절인수와 초기마모면 길이는 임의의 시점에서의 절인수와 마모면 길이를 구하는데 이용된다.

2.3 연삭 숫들면에서의 입자거동

연삭의 진행과 더불어 연삭 숫들에는 숫들 입자의 마모와 더불어 탈락, 새로운 입자의 출현등 계속적인 변화가 생긴다. 따라서, 연삭숫들 입자의 임의의 시간까지 남아있을 잔존율과, 새로 나오는 입자의 비율인 신출율을 이용하여 임의의 연삭 시점에 있어서의 연삭숫들 입자의 개수를 산출할 수 있다.

일정한 연삭 조건하에서 연마 입자가 생겨나서 n 회 연삭까지 남아 있을 확률 $S(n)$ 는 연삭 입자의 생성부터 탈락까지 평균절인수명 N 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$S(n) = \exp(-n/N) \quad (3)$$

여기서 연삭회수 n 은 연삭 숫들의 회전수와 가공 시간의 곱으로 이 사이에 숫들과 공작물의 간섭 횟수이다. 평균절인수명 N 은 칩의 단면적이 클수록, 공작물의 경도가 높을수록, 그리고 절인강도가 작을수록 감소하게된다.

지립절인의 탈락과 결손에 의해 절인선단이 숫들의 표면으로부터 후퇴하면 숫들 내층에 있던 절인이 새로이 연삭에 참여하게된다. 이 비율을 절인의 신출율 $E(n)$ 이라 하고 연삭 1회마다 절인이 새로 나오는 확률(0~1)로 정의한다. 신출율은 연삭되는 칩의 단면적이 크고 공작물의 경도가 높고 절인 강도가 낮은 경우에 절인이 탈락하기 쉬우므로 증가한다.

$k-1$ 회에서 탈락하지 않고 k 회에 남아있는 잔존 절인수는, $k-1$ 회에서의 절인수 $C_i(k-1)$ 에 잔존율 $S(k)$ (0~1사이의 값)의 곱으로 다음과 같이 표현된다.

$$C_s = C_i(k-1) \times S(k) \quad (4)$$

또, 신출 절인수는 다음과 같다.

$$C_n = C_i(k) \times E(k) \quad (5)$$

따라서 k 시점에서의 숫들면상의 전체 절인수 $C_i(k)$ 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$C_i(k) = C_s + C_n = C_i(k-1) \cdot \frac{S(k)}{(1-E(k))} \quad (6)$$

식 (6)에서 $C_i(0)$ 는 식 (2)의 C_0 (초기절인수)가 이용된다.

2.4 연삭숫들의 마모와 숫들의 반경 감소량

연삭이 진행됨에 따라서 연삭숫들은 입자의 마모 및 파쇄, 탈락에 의하여 반경이 감소된다. 마모속도 및 결손속도를 이용하여 반경 감소량을 구하게된다. 마모속도 및 결손속도는 다음과 같다.

마모속도는 칩체적(U_s)[2]에 의해 다음과 같이 크게 두 가지 실험식으로 분류된다.

$$D_w(k) = 8650 \cdot U_s^{2.2} \cdot H_w \cdot Z^{1.2} \quad \text{for } U_s < 0.004$$

$$D_w(k) = 0.205 \cdot U_s^{0.631} \cdot H_w \cdot Z^{1.2} \quad \text{for } U_s \geq 0.004 \quad (7)$$

여기서 H_w 는 마모속도를 표현하기 위해 경도의 지수함수 꼴로 표현되는 관계식이다. 또 Z 는 절인강도비(ratio of cutting edge strength)로서 결합도와 드레싱 효과의 상관관계식으로 표현된다. 한편, 결손속도는 다음과 같이 칩체적에 의해 크게 두 가지 실험식으로 분류된다.

$$D_f(k) = 0.753 \cdot U_s^{1.5} \cdot H_f \cdot Z^{-1.0} \text{ for } U_s < 0.01$$

$$D_f(k) = 0.017 \cdot U_s^1 \cdot H_f \cdot Z^{-0.8} \text{ for } U_s \geq 0.01 \quad (8)$$

여기서 H_f 는 결손속도를 표현하기 위해 경도의 지수함수 꼴로 표현되는 관계식이다. 마모속도 및 결손속도를 이용하여, 마모, 결손, 탈락에 의한 반경 감소를 각각 표현하면 다음과 같다. 먼저 절인의 마모에 의한 반경감소량은 다음과 같다.

$$W_w(k) = C_w \cdot (D_w(k) \cdot n)^{0.25} \quad (\text{mm}) \quad (9)$$

여기서 C_w 는 n 에 따라서 구분되어 얻어지는 실험적인 상수이며 $D_w(k)$ 는 절인의 마모속도(mm/회)이다. 또, 절인의 결손에 의한 반경감소량은 다음과 같다.

$$W_f(k) = C_f \cdot (D_f(k) \cdot n)^{0.4} \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

여기서 C_f 는 n 에 따라 구분되어 얻어지는 실험적 상수이며, $D_f(k)$ 는 절인의 결손속도(mm/회)이다. 마지막으로 입자의 탈락에 의한 반경감소량은 다음과 같다.

$$W_{fall}(k) = 0.005 \cdot \frac{D_g}{1000} \cdot R_{fall} \quad (\text{mm}) \quad (11)$$

여기서 탈락을 $R_{fall} = 1 - S(k)$ 이다. 따라서 전체 반경감소량은 $W_t = W_w + W_f + W_{fall}$ 이 된다.

3. 실험 및 시뮬레이션

3.1 프로그램의 개발

연삭 공정에 대한 시뮬레이션을 위해 앞에서 설명한 이론식을 근간으로 윈도우즈 응용 프로그램을 구성하였다. 본 프로그램은 연삭 스톨 마모나 연삭력, 표면조도 등을 출력으로 제공하도록 구성되었다.

3.2 실험 1

먼저, 제안한 이론식을 검증하기 위해 참고문헌[1]의 실험과 동일한 조건에서 시뮬레이션한 결과와 실험 결과를 비교하였다. Fig.1에는 연삭 스톨의 마모 추이를 보여주고 있다. 실험과 이론 모두, 연삭이 반복됨에 따라 마모량이 선형적으로 증가하는 특성을 보이고 있으며 정량적으로도 비교적 작은 오차가 있음을 알 수 있다. 입력 변수 중 일부의 부정확성에 의해 시뮬레이션 결과가 실제 실험치에 비해 약간 크게 평가되는 경향이 있지만 전체적인 경향성은 매우 잘 일치하고 있다.

한편, Fig.2 은 가공을 반복하면서 측정된 표면조도와 계산으로부터 얻어진 표면조도를 비교해서 보여주고 있다. 이론에서 얻어진 표면조도가 반복 가공 조건하에서도 비교적 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타나고 있는 반면, 실험에서는 가공의 진행에 따라 표면조도도 나빠지는 것으로 볼 수 있다. 이것은 표면조도에 관한 이론식이 스톨의 마모나 연삭력의 변화 등에 대한 효과를 정확히 고려하고 있는 못한 것이 그 원인으로 추정된다. 그러나 여기서도 정량적으로 이론과 실험치가 대체로 잘 일치하고 있어 실용적으로 활용하기에 문제가 없을 것으로 판단된다.

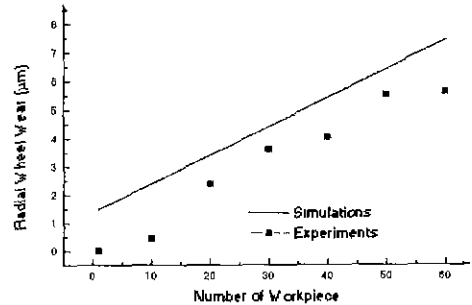


Fig. 1 Comparison of experiment [1] and simulation for grinding wheel wear

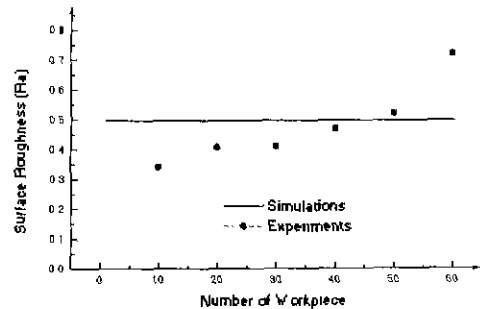


Fig. 2 Comparison of experiments[1] and simulations for the roughness

3.3 실험 2

연삭숫돌마모 및 연삭력을 측정하기 위해 시스템을 구성하였다. 가공 중에 힘을 측정할 수 있도록 공구동력계를 설치하였으며, 가공 후 기상에서 숫돌마모를 측정할 수 있도록 LSM을 설치하였다. 숫돌마모 측정시 광화이버식 트리거 센서를 이용하여 동일한 시점에서 측정 가능하도록 하였다. 수치계산 및 실험에서 사용된 연삭숫돌 및 공작물의 조건은 Table 1 과 같다.

측정된 결과를 시뮬레이션 결과와 비교한 결과를 Fig. 3,4 에 나타내었다. 앞에서의 예와 마찬가지로 연삭숫돌 마모에서는 1 μm 정도의 편차가 있었으나 그 경향은 잘 일치하고 있다. 연삭력 부분에서는 실험결과가 일정한 값을 기준으로 약간씩의 증가 감소가 되풀이되었고, 시뮬레이션 쪽에서는 약간씩 증가하는 경향을 보였으나, 유의수준에서 크게 벗어나지 않는 수준으로서 이론과 실험이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연삭 공정 시뮬레이션 프로그램을 구성하였으며, 평면연삭에서의 마모량, 연삭력, 표면거칠기를 시뮬레이션 하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 원통 연삭 시뮬레이션 시스템의 실험식 [2]을 바탕으로 구성되어 있으므로 평면 연삭에서의 제반 파라미터들을 원통 연삭의 파라미터로 치환하여 입력되도록 하였다. 시뮬레이션과의 비교를 위해 동일한 조건에서 플런지 연삭을 시행하였고 LSM 및 공구동력계 그리고 표면조도 측정기를 이용하여 연삭 숫돌 마모 및 연삭력, 그리고 연삭표면의 조도를 측정하였다. 마모는 실험과 시뮬레이션의 경향은 일치하지만 약간의 오프셋이 관찰되고 있으며 힘과 표면조도는 값의 크기는 대체로 일치하고 있으며 변화 경향 면에서 약간의 차이가 발생하고 있으나 실용적인 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Table 1 Experimental condition

Grinding wheel	WA46CV
Width of Grinding	29mm
Cutting speed	Φ 284mm \times 1700rpm
Table feeding speed	0.72m/s
Grinding method	Plunge Grinding
Depth of Cut	10 μm
Workpiece	SM20C

후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 "첨단기계

류·부품"사업의 "연삭 메커니즘의 일류화 제품 기술 개발"과제의 위탁과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

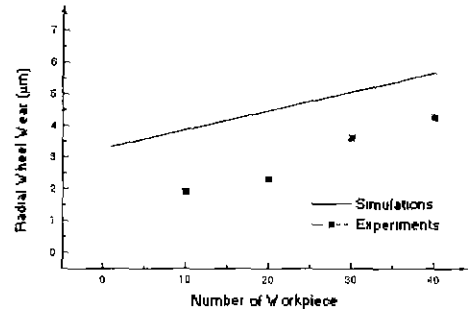


Fig.3 Comparison of experiments and simulations for grinding wheel wear

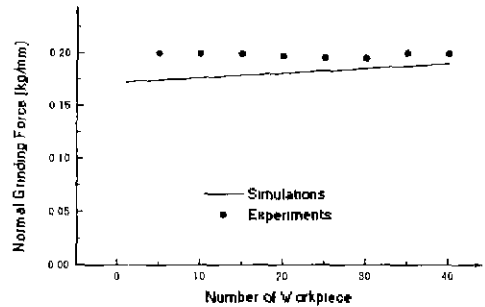


Fig.4 Comparison of experiments and simulations for grinding force

참고문헌

- [1] 주광훈 외3인, "LSM을 이용한 연삭 숫돌 마모 모니터링," 한국정밀공학회지 Vol.17, No.12, 2000.
- [2] 이용숙, 원통 연삭 작업의 시뮬레이션에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원 기계공학과, 1997.
- [3] T. Suto, H. Inoue, T. Waida, H. Noguchi, K. Tamakohri, T. Sata, "A newly Developed In-Process Sensor for Detecting Active Grain Wear in Grinding Operation," *Annals of the CIRP*, Vol25, No.1, pp229-234, 1976.
- [4] T. Suto. and T. Sata, "Simulation of Grinding Process Based on Wheel Surface Characteristics," *Bull. Japan Soc. of Prec. Eng.*, Vol.15, No.1, pp27-33, 1981.