

선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 절삭 동력 기반의 주축 회전수 최적화

Spindle Speed Optimization Based on Cutting Power for High-Efficient Machining in Turning Process

*강유구¹, 조재완¹, #김석일²

*You-Gu Kang¹, Jae-Wan Cho¹, #Seok-Il Kim(sikim@kau.ac.kr)²

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원, ² 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Key words : High-Efficiency Turning, Turning Process, Spindle speed, Optimization, Cutting Power

1. 서론

대다수의 부품 가공업에서는 다품종 소량 생산으로서 생산성 및 절삭율 향상이 필요하고 아울러 빠른 납기, 적은 비용, 고품질도 지향해야 하는 실정이다. 이를 위해서 공작기계는 고속화를 추구하게 되고, 자동화를 실현하여 가공 시간의 단축을 목표로 하고 있다. 본 연구에서는 선삭 공정에서 고능률 가공의 구현을 위하여 절삭 동력을 최대 허용 수준이 유지되도록 주축 회전수를 변화시키는 ‘절삭 동력을 이용한 주축 회전수의 최적화 방법’을 제안하였다. 이를 위해서 공구 인서트 형상과 공작물 사이의 기하학적 불리안 연산(Boolean operation)을 통해 공구에 의한 공작물의 절삭 부위를 신속하게 계산하였고, 선삭 공정에서의 절삭 상황과 관련된 절삭 매개변수들을 도출하였다. 또한, 절삭력 및 절삭 동력의 해석 모델을 구축하였으며, 최대 허용 절삭 동력으로부터 미소 이송 경로에서의 최적 주축 회전수를 산정하였다. 또한, 절삭력 및 절삭 동력 해석 모델에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 CNC 선반의 가감속 특성을 고려하였다. 특히 본 연구에서 제안한 ‘선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 절삭 동력 기반의 주축 회전수 최적화 방법’은 절삭 실험 및 이송량 최적화를 통해서 얻은 결과와 본 연구에서 제안한 방법을 통해 예측한 결과의 비교 분석을 통해 그 유용성을 입증하였다.

2. 선삭 공정의 절삭 동력 해석

2.1 최대 칩 두께

선삭 공정에서 일반적으로 사용하는 공구 인서트 중에서 C, D, S, T, V 및 W 형태의 공구 인서트 형상에 대한 최대 칩 두께 h_{ex} (mm)는 이송량 f_n (mm/rev)과 접근 각도 κ_r (deg)를 이용하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$h_{ex} = f_n \times \sin \kappa_r \quad (1)$$

그리고 R 형태의 공구 인서트 형상에 대한 최대 칩 두께 h_{ex} 는 식 (2)와 같은 형태로 표현된다.

$$h_{ex} = f_n \times \sqrt{\frac{4a_p}{iC} - \left(\frac{2a_p}{iC}\right)^2} \quad (2)$$

2.2 비절삭 저항과 절삭 동력

공구의 접근 각도 κ_r 와 최대 칩 두께 h_{ex} 그리고 공칭 비절삭 저항(0.4 mm의 칩 두께에 대한 비절삭 저항) $k_{c0.4}$ 을 이용하면 비절삭 저항 k_c (N/mm²)를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$k_c = k_{c0.4} \times \left[\frac{0.4}{h_{ex}}\right]^{0.29} \quad (3)$$

선삭 공정에서의 절삭 동력 P_c 는 식 (2)에서 제시한 최대 칩 두께 h_{ex} 와 비절삭 저항 k_c 에 관한 식 (3)을 이용하여 식 (4)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$P_c = \frac{V_c \times a_p \times f_n \times k_{c0.4}}{60} \left[\frac{0.4}{f_n \times \sin \kappa_r} \right]^{0.29} \quad (4)$$

2.3 주축 회전수의 최적화

선삭 공정에서의 절삭 동력은 식 (4)에서 나타난 바와 같이 절삭 속도의 함수이므로 절삭 속도를 절삭 동력의 함수로 표현되도록 변환하면 식 (5)와 같이 쓸 수 있고, 다음과 같이 선삭 공정에서 최대 허용 동력에 대하여 최적의 절삭 속도 및 주축 회전수를 산정할 수 있다.

$$V_c = \frac{60 \times P_c}{a_p \times f_n \times k_{c0.4} \times \left[\frac{0.4}{f_n \times \sin \kappa_r} \right]^{0.29}} \quad (5)$$

$$N = \frac{6 \times 10^4 \times P_c}{a_p \times f_n \times k_{c0.4} \times \pi \times D_m \times \left[\frac{0.4}{f_n \times \sin \kappa_r} \right]^{0.29}} \quad (6)$$

3. 절삭 실험 및 고찰

3.1 절삭 실험 장치 및 실험 방법

실험 장치는 CNC 선반(대우중공업 Puma 150G), 공구 동력계(Kistler 9265B), 전하 증폭기(Kistler 5807A), 그리고 DAQ 보드(National Instrument PCI-6250)로 구성되며, 절삭 실험은 공구의 접근 각도가 93°인 J 타입의 WTJNL2525M16 홀더를 사용하였고, 공구 인서트는 TT3500 소재의 TNMG160408(대구텍)을 사용하였으며, 공작물은 기계 구조용 탄소강인 SM45C를 사용하였다.

절삭 실험은 Fig. 1과 같은 형상을 대상으로 초기 NC 프로그램을 절삭 동력 500 W에 대하여 주축 회전수를 최적화한 NC 프로그램을 이용하여 절삭 가공을 수행하였다.

NC 프로그램은 ㈜이엔소프트의 CNC 선반용 CAD/CAM 시스템인 EnS-Turn의 최적화 모듈을 이용하여 생성하였으며, 공구 동력계에서 감지되는 절삭력은 DAQ 보드를 통해서 0.01 sec의 샘플링 주기로 측정하였다.

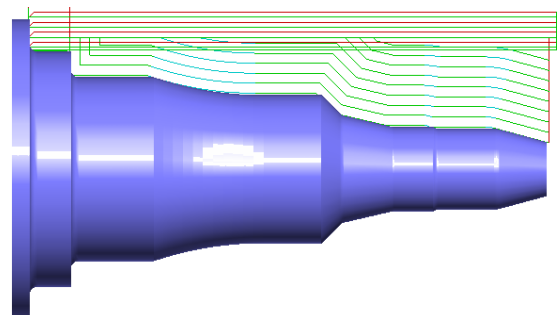


Fig. 1 Test model of cutting experiment

3.2 절삭 실험 결과 및 고찰

Fig. 2 는 실험 모델에 대한 초기 NC 프로그램을 최대 허용 절삭 동력이 500 W 인 경우에 대해서 주축 회전수를 최적화한 NC 프로그램을 이용해서 절삭 실험을 수행하여 측정된 절삭력과 예측 값을 비교하여 보여주고 있는데, 측정값과 예측값이 잘 일치한다는 사실로부터 절삭 동력을 바탕으로 구축한 주축 회전수의 해석 모델이 높은 신뢰성을 갖는다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 1 에 제시한 실험 모델에 대한 최대 절삭 동력이 753 W 로 예측되었으므로, 최대 절삭 동력을 753 W 로 설정하고 주축 회전수의 상한과 하한을 기존 주축 회전수 1,000 rpm 의 300 %와 10 %인 3,000 rpm 과 100 rpm 으로 하는 주축 회전수의 최적화를 수행하였다. 특히, 허용 편차를 주축 회전수의 상한 3,000 rpm 의 0.1 %인 3 rpm 으로 설정하여 이보다 작은 인접한 미소 이송 경로들을 재통합함으로써 최적 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다. 이러한 개념으로 138 개의 NC 블록들로 구성된 초기 NC 프로그램은 미소 이송 경로의 재통합 과정을 거쳐서 500 개의 NC 블록들로 구성된 최적 NC 프로그램으로 변환되었으며, 최적화 과정의 소요 시간은 3.0 GHz 의 CPU 가 탑재된 Intel Pentium-IV 에서 1.81 sec 로서 매우 짧게 나타났다.

Fig. 3 은 최대 허용 절삭 동력을 753 W 로 하고 주축 회전수를 최적화하여 절삭 실험을 수행하였을 경우에 절삭 동력의 예측 결과를 보여주고 있는데, 이 때의 가공 시간은 최적화 이전의 가공 시간인 191.0 sec 의 80.4 % 수준인 153.6 sec 로 감소하였다. 그러나, Fig. 2 의 실험 결과로부터

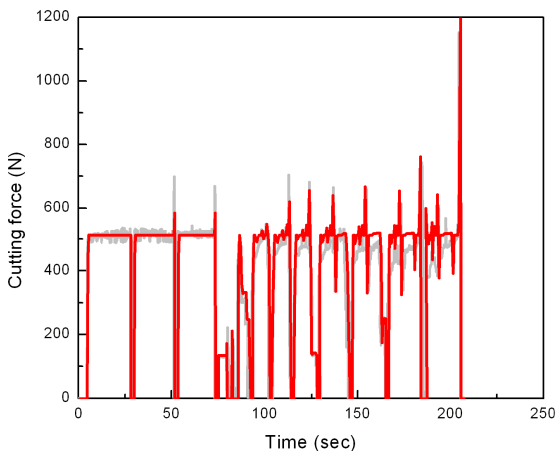


Fig. 2 Cutting force at optimum spindle speed for the maximum allowable power of 500 W

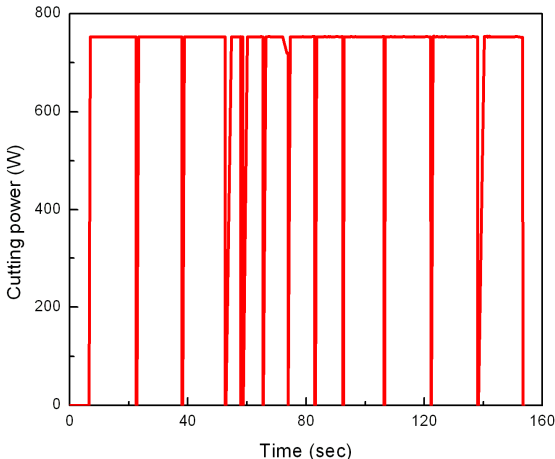


Fig. 3 Cutting power at optimum spindle speed for the maximum allowable power of 753 W

최대 허용 절삭 동력을 측정된 최대 허용 절삭 동력인 753 W 의 약 2/3 수준인 500 W 에 대해서 최적화 하였을 경우에는 가공 시간이 207.6 sec 로 오히려 최적화 이전의 가공 시간 보다 7.5 % 정도 더 소요된 것으로 나타났다. 위의 결과로부터 주축 회전수를 최적화하여 생산성을 향상시키기 위해서는 일정 수준 이상의 절삭 동력에 대해서 최적화할 필요가 있다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 3 에서 나타낸 바와 같이 최대 허용 절삭 동력을 753 W 로 설정하여 주축 회전수에 대해서 최적화된 NC 프로그램으로 가공하였을 경우에는 가공의 전체 구간에 걸쳐서 일정한 절삭 동력을 유지하는 것을 볼 수 있다. 이는 가공을 수행하는 동안 기계가 가용한 절삭 동력을 충분히 활용하면서 과부하 방지 및 가공 품질의 향상에 크게 기여한다는 것을 의미한다

4. 결론

본 연구에서는 CNC 선반의 황삭 공정에 대한 고능률 가공을 구현하기 위해서 ‘선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 절삭 동력 기반의 주축 회전수 최적화 방법’을 제안하였고, 그 유용성을 검토하였다. 그리고 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 주축 회전수 최적화 결과에 대한 정밀도 및 신뢰성의 향상을 위해서 미소 이송 경로에서의 단위 이송 거리를 1 mm 이하가 되도록 이송 경로를 보간하였고, 그 미소 이송 경로를 토대로 공구의 미소 절삭 영역을 산정하였다.
- (2) 공구의 미소 절삭 공간과 공작물 형상 사이의 불리안 연산을 통해 절삭 상황과 관련된 절삭 매개변수를 산정하였고, 공구 및 공작물의 정보와 최대 허용 절삭 동력에 대한 미소 이송 경로에서의 최적 주축 회전수를 결정하였다.
- (3) 동일한 NC 블록에서 생성된 최적 주축 회전수의 차이가 허용 편차 이내로 매우 작은 인접한 미소 이송 경로를 통합함으로써 최적 NC 프로그램의 크기를 최소화 하였다.
- (4) 절삭 실험을 통해 측정된 실제 가공 시간과 이론 가공 시간의 차에 대한 전체 가공 구간에서의 주축 회전수의 변화량 함의 비를 주축 회전수가 변화하는 각 절삭 구간의 가속 및 감속 구간에 적용함으로써 CNC 선반의 가감속 특성을 반영하였으며, 측정값과 예측값의 비교를 통해 그 유효성을 입증하였다.
- (5) 동일한 최대 허용 절삭 동력에 대해서 이송량 및 주축 회전수를 각각 최적화하여 가공을 수행한 결과 이송량의 최적화가 주축 회전수의 최적화보다 생산성 향상 측면에서 더 효과적으로 나타났으며, 주축 회전수의 최적화로 생산성을 향상시키기 위해서는 일정 수준 이상의 절삭 동력에 대해서 최적화해야 하는 것으로 나타났다.
- (6) 본 연구에서 제안한 ‘고능률 가공을 위한 절삭 동력 기반의 주축 회전수 최적화 방법’은 최적화 과정에 소요되는 계산 시간이 매우 짧으며, 과부하를 방지할 뿐만 아니라 고능률 및 고품질 가공에 효과적인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Kang, Y. G., Cho, J. W., and Kim, S. I., “Feed Optimization Based on Virtual Manufacturing for High-Efficient Turning,” Trans. of the KSME (A), Vol. 31, No. 9, pp. 960~966, 2007.
2. Sandvik Coromant, “Metal Cutting Technical Guide,” Metalworking Products, 2006.
3. <http://www.aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=128&pageid=2144416321>
4. http://ensoft21.co.kr/sub3_3.htm