

〈 논문 〉

고능률 선삭 가공을 위한 가상 가공 기반의 이송량 최적화

강유구* · 조재완* · 김석일†

(2007년 6월 12일 접수, 2007년 7월 31일 심사완료)

Feed Optimization Based on Virtual Manufacturing for High-Efficiency Turning

You-Gu Kang, Jae-Wan Cho and Seok-II Kim

Key Words : High-Efficiency Turning(고능률 선삭 가공), Virtual Manufacturing(가상 가공), Feed (이송량), Optimization(최적화), Cutting Power(절삭 동력)

Abstract

High-efficient machining, which means to machine a part in the least amount of time, is the most effective tool to improve productivity. In this study, a new feed optimization method based on virtual manufacturing was proposed to realize the high-efficient machining in turning process through the cutting power regulation. The cutting area was evaluated by using the Boolean intersection operation between the cutting tool and workpiece. And the cutting force and power were predicted from the cutting parameters such as feed, depth of cut, spindle speed, specific cutting force, and so on. Especially, the reliability of the proposed optimization method was validated by comparing the predicted and measured cutting forces. The simulation results showed that the proposed optimization method could effectively enhance the productivity in turning process.

1. 서론

최근 절삭 가공의 고능률화와 고정밀화에 대한 필요성이 급증하면서 CNC 공작기계의 보급도 급속하게 증가하고 있다. 산업 현장에서 CNC 공작기계를 사용할 때는 작업자가 자신의 경험과 지식을 토대로 절삭 조건을 설정하게 된다. 그러나 공구와 공작물의 재질이 다양하고, 가공 방법과 제품 형상에 따라서 공구에 의한 공작물의 절삭 부위가 지속적으로 변하기 때문에 작업자의 경험과 지식만으로 최적의 절삭 조건을 체계적으로 설정하는 것은 실제로 매우 어려운 일이다. 특히 가공 시간과 품질에 지대한 영향을 미치는 절삭 속도, 이송량 등의 설정은 공구 제조회사에서 제공하는 추천값을 토대로 설정한 후, 작업자가 절삭 상태를 확인하면서 수동으로 조정하여 절삭 조건을 선정하게 된다. 그러나 이 경우에는 절대적으로 작

업자의 감각에 의존하기 때문에 효과적인 절삭 조건을 보장할 수 없게 된다.

또한 선삭 공정에서는 이송량이 클수록 공구 및 공작물의 파손, 제품의 품질 저하 등이 발생할 가능성이 높아지기 때문에 실제 절삭 시에는 비교적 작은 이송량으로 가공하는 것이 일반적이다. 그러나 이송량의 감소는 가공 시간의 증가를 초래하고, 그 결과로 생산성이 낮아지게 된다. 이 문제점을 해결할 수 있는 고능률 가공을 위해서는 무엇보다도 일정 수준의 절삭 동력이 소모되도록 이송량을 산정하고, 그것을 토대로 NC 프로그램을 생성하는 것이 필요하다. 이러한 형태의 이송량 최적화는 가공 시간 단축 외에도 과도 절삭력 방지, 공구 수명 증가 등과 같은 효과를 주게 된다.

그 동안 선삭 공정에서의 고능률 가공을 구현하기 위한 노력으로 적응 제어 기법,^(1,2) 견인 제어 기법,⁽³⁾ 퍼지 제어 기법⁽⁴⁻⁶⁾ 등과 같은 다양한 제어 방법들이 절삭력을 일정하게 유지하기 위해서 도입되어 왔다. 이러한 방법들은 절삭 상태의 예측 결과를 토대로 실시간으로 이송 속도를 조절하고, CNC 선반과 직접 연계해서 사용할 수 있다는 장점이 있지만, 실제 CNC

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : sikim@kau.ac.kr
TEL : (02)300-0176 FAX : (02)3158-4231

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부

선반에 적용하기 위해서는 센서, 전용 제어기 등과 같은 하드웨어의 설치 비용과 유지 비용이 필요하고, 기계 별로 전용 제어기의 설정 조건을 별도로 조정해야 한다는 문제점을 가지고 있다.⁽⁷⁾

따라서 본 연구에서는 제어·계측용 하드웨어의 사용을 배제한 상태에서 CNC 선반의 황삭 공정에 대한 고능률 가공을 구현하기 위해서 가상 가공 기법을 토대로 산정한 절삭 동력이 허용 수준을 유지하도록 이송량을 변화시키는 이송량 최적화 방법을 제안하였다. 이를 위해서 선삭 공정에 대한 절삭 동력 해석 모델을 구축하였고, 미소 이송 경로에 대한 공구와 공작물 사이의 불리안 연산(Boolean operation)^(8,9)을 통해서 공구에 의해서 제거되는 공작물 부위를 계산하였다. 그리고 최대 허용 절삭 동력을 이용한 절삭 동력 해석 모델의 역 연산 과정을 통해서 미소 이송 경로에서의 최적 이송량을 도출하였고, 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 매우 작은 이웃한 미소 이송 경로들을 재통합함으로써 최적화된 NC 프로그램을 생성하였다. 특히 본 연구에서 제안한 ‘고능률 선삭 가공을 위한 가상 가공 기반의 이송량 최적화 방법’은 일련의 가공 실험과 가상 가공을 통해서 얻은 가공 시간, 이송량, 절삭 동력 등에 대한 비교 분석을 통해서 그 유용성을 검증하였다.

2. 선삭 공정의 절삭 동력 해석

Fig. 1 은 공작물의 회전과 공구의 이송에 의해서 가공이 수행되는 선삭 공정의 일반적인 형태를 보여 주고 있다. 미소 이송 경로에 대한 절삭 면적 A_c (mm^2)는 공구와 공작물 형상 사이의 불리안 연산을 통해서 산정할 수 있으며, 미소 이송 경로에서의 절삭 깊이 a_p (mm)는 절삭 면적과 공구의 미소 이송 거리 d_c (mm)를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$a_p = \frac{A_c}{d_c} \tag{1}$$

Fig. 2 는 선삭 공정에서 사용하는 공구의 홀더와 인서트 형상들을 나타낸 것이고, Fig. 3 은 인서트 형상에 따른 최대 칩 두께 h_{ex} (mm)를 표시한 것이다. C, D, S, T, V 및 W 형태의 인서트 형상에 대한 최대 칩 두께 h_{ex} 는 Fig. 3(a)에서의 접근 각도 κ (deg)와 이송량 f_n (mm/rev)를 이용하면 식 (2)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$h_{ex} = f_n \times \sin \kappa, \tag{2}$$

또한 R 형태의 인서트 형상에 대한 최대 칩 두께 h_{ex} 는 Fig. 3(b)에서의 절삭 깊이 a_p , 이송량 f_n 및 선단

직경 iC 를 이용하면 아래와 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$h_{ex} = f_n \times \sqrt{\frac{4a_p}{iC} - \left(\frac{2a_p}{iC}\right)^2} \tag{3}$$

비절삭 저항 k_c (N/mm^2)는 최대 칩 두께 h_{ex} , 공구의 접근 각도 κ_r 과 공칭 비절삭 저항(0.4 mm의 칩 두께에 대한 비절삭 저항) $k_{c0.4}$ 에 의해서 식 (4)와 같은 형태로 주어진다.⁽¹⁰⁾

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

비절삭 저항 k_c 는 단위 면적 당의 절삭력이라는 의미와 함께 단위 체적 당의 절삭 에너지라는 의미도 가지고 있다. 따라서 선삭 공정에서의 절삭력 F_c (N)와 절삭 동력 P_c (W)는 비절삭 저항 k_c , 절삭 깊이 a_p , 이송량 f_n , 절삭 속도 v_c 등에 의해서 식 (5)와 (6)의 형태로 표현된다.⁽¹¹⁾

$$F_c = k_c \times a_p \times f_n \tag{5}$$

$$P_c = \frac{v_c \times F_c}{60} \tag{6}$$

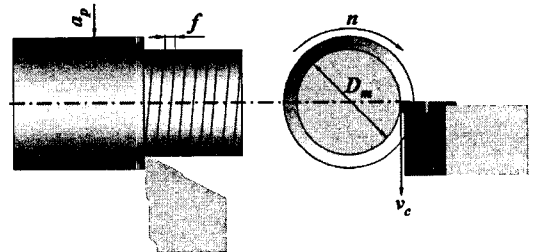


Fig. 1 Lathe operation

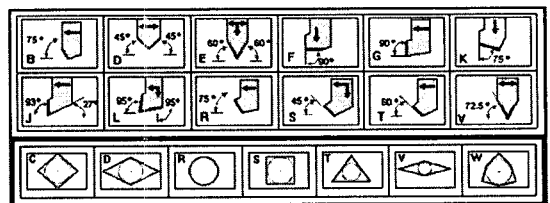
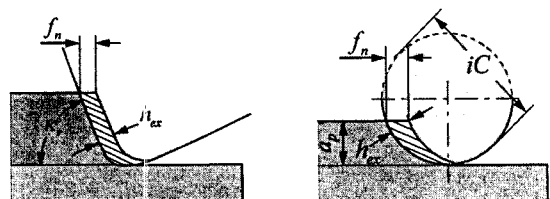


Fig. 2 Holder and insert shapes



(a) Insert shape: C, D, S, T, V, W

(b) Insert shape: R

Fig. 3 Maximum chip thickness

결과적으로 절삭 동력 P_c 는 식 (2)의 최대 칩 두께 h_{ex} 와 식 (4)의 비절삭 저항 k_c 를 식 (6)에 대입함으로써 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$P_c = \frac{v_c \times a_p \times f_n \times k_{c0.4}}{60} \left[\frac{0.4}{f_n \times \sin \kappa_r} \right]^{0.29} \quad (7)$$

3. 이송량 및 NC 프로그램의 최적화

3.1 공구 및 공작물의 설정

Fig. 4는 선삭 공정의 절삭 동력을 해석하기 위해 필요한 공구 DB와 공작물 DB의 구성도를 보여주고 있다. 공구 DB는 접근 각도, 절삭날 길이, 선단 각도, 선단 반경, 홀더 길이, 홀더 폭 등과 같은 형상 정보 외에도 공구 제조업체, 공구 형태 등과 관련된 공구 정보들을 체계적으로 관리하고 검색하기 위해서 관계형 DB 형태로 구축하였다. 그리고 공작물 DB는 공작물의 재질, 공칭 비절삭 저항, 가공 지수 등과 같은 공작물 정보들을 관리하고 검색하기 위해서 구축하였다.

3.2 이송량의 최적화

본 연구에서 제안한 ‘고능률 선삭 가공을 위한 가상 가공 기반의 이송량 최적화 방법’은 선삭 공정에서의 절삭 동력이 최대 허용 수준을 유지하도록 이송량을 변화시키는 개념에 기반을 두고 있다. 따라서 선삭 공정의 절삭 동력 해석 모델에 대한 역 연산 과정을 통해서 최적의 이송량을 도출할 필요가 있다.

식 (7)은 선삭 공정에서의 절삭 동력이 이송량의 함수임을 의미하기 때문에 그 역 함수를 구하면 절삭 동력으로부터 이송량을 산정할 수 있게 된다. 따라서 식 (7)의 역 함수인 식 (8)로부터 선삭 공정에서의 최대 허용 절삭 동력을 유지하는 최적의 이송량을 도출할 수 있다.

$$f_n = \left[\frac{\sin \kappa_r}{0.4} \right]^{0.29} \times \left[\frac{60 \times P_c}{v_c \times a_p \times k_{c0.4}} \right]^{0.71} \quad (8)$$

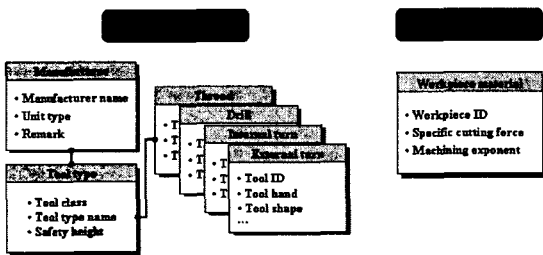


Fig. 4 Tool and workpiece databases

3.3 NC 프로그램의 최적화

Fig. 5는 초기 NC 프로그램으로부터 이송 경로의 생성, 이송 경로의 보간에 의한 미소 이송 경로의 생성, 미소 이송 경로에 대한 이송량의 최적화, 그리고 그 결과를 토대로 한 NC 프로그램의 최적화 등의 과정을 순서대로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 초기 NC 프로그램에 대한 역 후처리(reverse post-processing) 과정을 통해서 이송 경로를 생성한 후, 이송량의 최적화 결과에 대한 정밀도를 유지할 수 있도록 하나의 NC 블록(NC block)에서의 공구 이송 거리가 1 mm 이하가 되도록 이송 경로를 보간함으로써 미소 이송 경로를 생성하였다. 그리고 미소 이송 경로를 토대로 생성한 공구의 미소 절삭 영역과 공작물 형상 사이의 불리안 연산을 통해서 선삭 공정에서의 절삭 매개변수들을 산정한 후 이송량의 최적화 관계식인 식 (8)을 이용해서 미소 이송 경로에서의 최적 이송량을 결정하였다. 특히 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 매우 작은 이

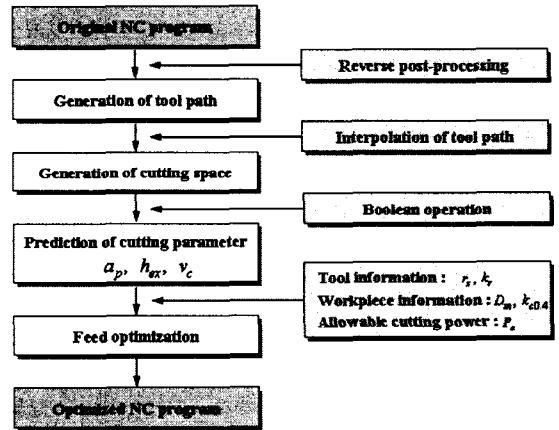


Fig. 5 NC program optimization process

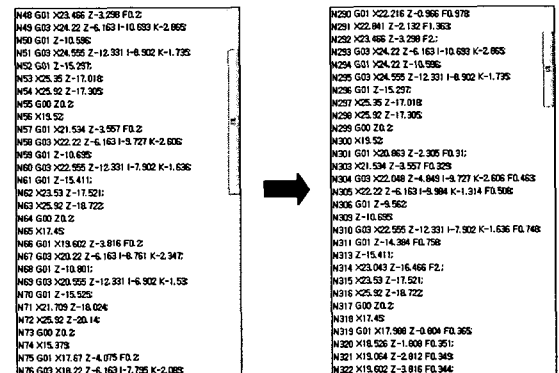


Fig. 6 Example of NC program optimization

옳한 미소 이송 경로들을 서로 통합함으로써 최적화된 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다. Fig. 6은 이러한 개념을 토대로 수행한 NC 프로그램의 최적화 사례를 보여주고 있다.

4. 실험 및 고찰

4.1 실험 장치

Fig. 7은 CNC 선반(대우중공업 Puma 150G), 공구 동력계(Kistler 9265B), 전하 증폭기(Kistler 5807A), 그리고 DAQ 보드(National Instrument PCI-6250)로 구성된 절삭 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이고, Fig. 8은 공구 동력계를 CNC 선반에 장착한 모습을 보여주고 있다.

본 연구에서는 두 번의 절삭 실험을 수행하였는데, 첫 번째 실험의 공구 홀더로는 공구 접근 각도가 90°인 PTGNL2525M16을 사용하였고, 두 번째 실험의 공구 홀더로는 공구 접근 각도가 93°인 WTJNL2525M16을 사용하였다. 그리고 인서트는 TT3500 소재의 TNMG160408을 사용하였으며, 공작물의 재질은 기계 구조용 탄소강인 SM45C이다.

4.2 실험 방법

Figs. 9와 10은 본 연구에서 사용한 두 절삭 실험

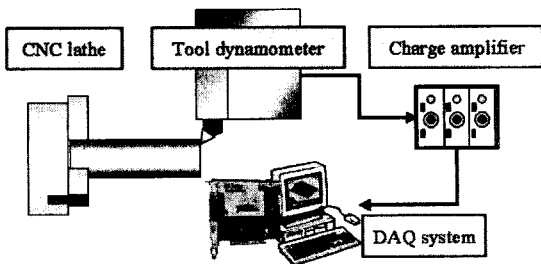


Fig. 7 Schematic diagram for experimental setup

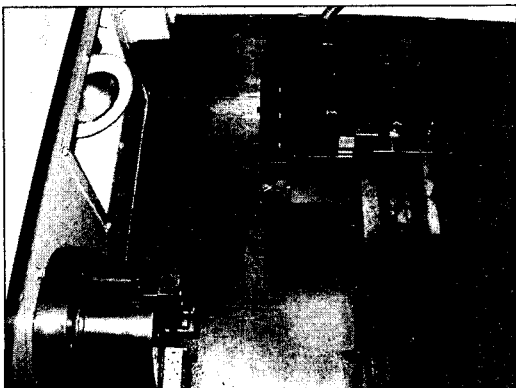


Fig. 8 Tool dynamometer setup

험 모델들을 보여주고 있는데, 이러한 절삭 실험 모델들을 CNC 선반에서 가공하기 위해서 필요한 NC 프로그램은 (주이엔소프트의 CNC 선반용 CAD/CAM 시스템인 EnS-Turn⁽¹²⁾)에 기반을 두고 생성하였다.

첫 번째 실험은 공작물 직경 50 mm, 주축 회전수 800 rpm, 절삭 이송량 0.1 mm/rev 인 상태에서 절입 깊이를 1.8 mm 부터 0.6 mm 까지 0.3 mm 씩 변화시키면서 단계 별로 길이 방향으로 10 mm 씩 절삭을 수행하였고,⁽⁴⁾ 두 번째 실험에서는 공작물 직경 30 mm, 주축 회전수 1,000 rpm, 절삭 이송량 0.2 mm/rev, 절입량 1 mm 인 상태에서 절삭을 수행하였다. 그리고 공구 동력계에서 감지되는 절삭력은 DAQ 보드를 통해서 0.01 sec 의 샘플링 주기로 측정하였다.

4.3 실험 결과 및 고찰

공작물의 재질인 SM45C 의 공칭 비절삭 저항 $k_{c0.4}$ 가 2,100 N/mm² 이라는 사실⁽¹⁰⁾을 이용하면 식 (4)와 (5)로부터 절삭력, 그리고 식 (6)으로부터 절삭 동력을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 NC 프로그램의 최적화 기능과 함께 이러한 절삭력과 절삭 동력의 예측 기능을 EnS-Turn 에 추가함으로써 가상 가공을 통해서 절삭력과 절삭 동력을 예측하였다. Fig. 11은 EnS-Turn 을 이용해서 수행한 가상 가공 사례를 나타낸 것으로, 화면 좌측에서는 최적화된 NC 프로그램, 화면 중앙에서는 가상 가공 과정, 화면 하단 좌측에서는 식 (6)을 이용해서 에

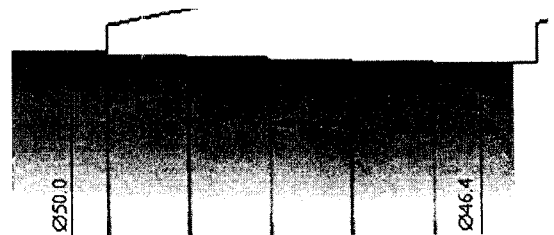


Fig. 9 First test model

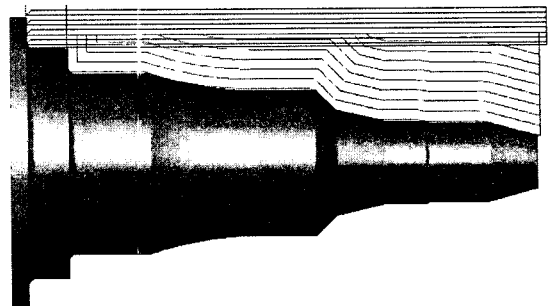


Fig. 10 Second test model

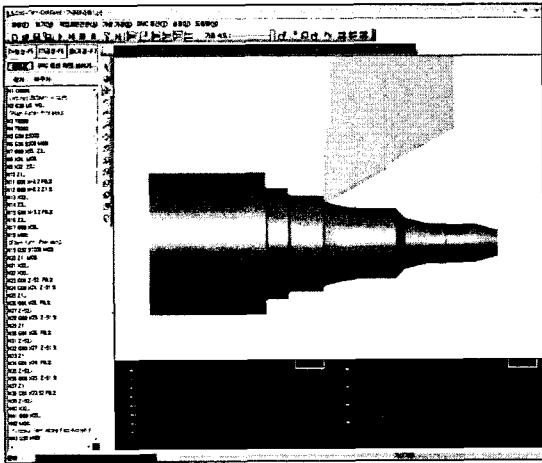


Fig. 11 Virtual manufacturing by using EnS-Turn

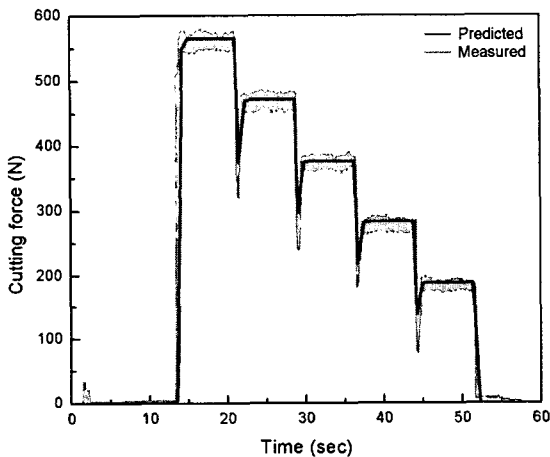


Fig. 12 Comparison of measured and predicted cutting forces for the first test model

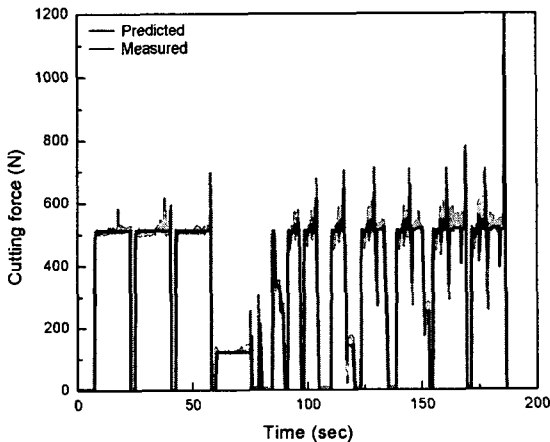


Fig. 13 Comparison of measured and predicted cutting forces for the second test model

측한 절삭 동력의 그래프, 그리고 화면 하단 우측에서는 식 (5)를 이용해서 예측한 절삭력의 그래프를 볼 수 있다.

Figs. 12와 13은 Figs. 9와 10에 제시한 절삭 실험 모델들에 대한 절삭력의 측정값과 식 (5)에 기반을 둔 예측값을 비교해서 나타낸 것인데, 두 실험 모델 모두에 대해서 측정값과 예측값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히 이러한 비교 결과들은 비절삭 저항 관계식을 토대로 구축한 절삭력 및 절삭 동력의 해석 모델이 높은 신뢰성을 갖는다는 사실을 보여주는 것이다.

Fig. 14는 Fig. 10에 제시한 두 번째 실험 모델에 대한 절삭 동력을 예측한 결과를 보여주고 있는데, 이 경우의 최대 절삭 동력은 1,175 W로 최종 윤곽 가공 구간에서 공구가 공작물의 벽면과 접촉할 때 발생하였다. 그러나 그 경우를 제외한 나머지 구간에서의 최대 절삭 동력은 753 W이며, 첫 번째 외경 가공 구간에서 발생된다. 따라서 본 연구에서는 최대 허용 절삭 동력을 753 W로 설정하고, 이송량의 상한과 하한을 기존 이송량 0.2 mm/rev의 1,000 %와 5 %인 2 mm/rev와 0.01 mm/rev로 하는 이송량의 최적화를 수행하였다. 특히 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 이송량의 상한 2 mm/rev의 1 %에 해당하는 0.02 mm/rev 이하인 이웃한 미소 이송 경로들을 서로 재통합함으로써 최적 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다. 이러한 개념에 의해서 138 개의 NC 블록들로 구성된 초기 NC 프로그램은 715 개의 미소 이송 경로들로 세분화된 후 미소 이송 경로의 재통합 과정을 거쳐서 524 개의 NC 블록들로 구성된 최적 NC 프로그램으로 변환되었으며, 최

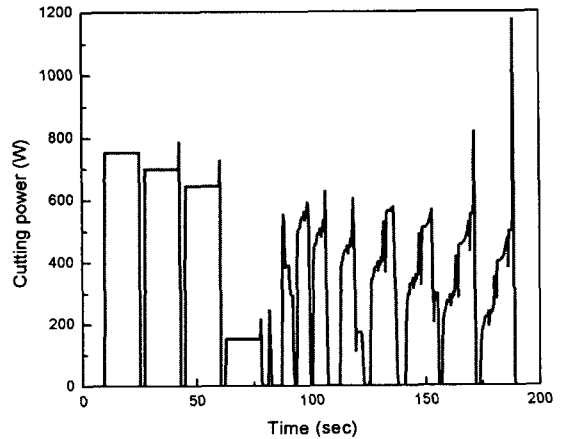


Fig. 14 Cutting power of the second test model

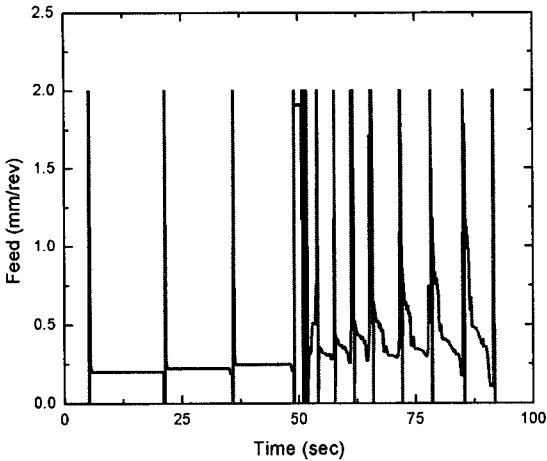


Fig. 15 Optimum feed for the maximum allowable power of 753 W

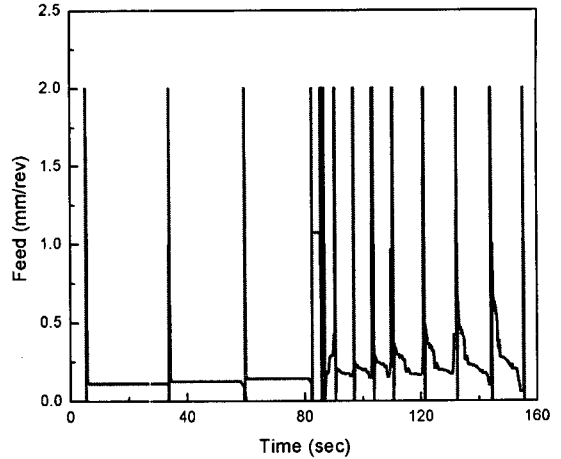


Fig. 17 Optimum feed for the maximum allowable power of 500 W

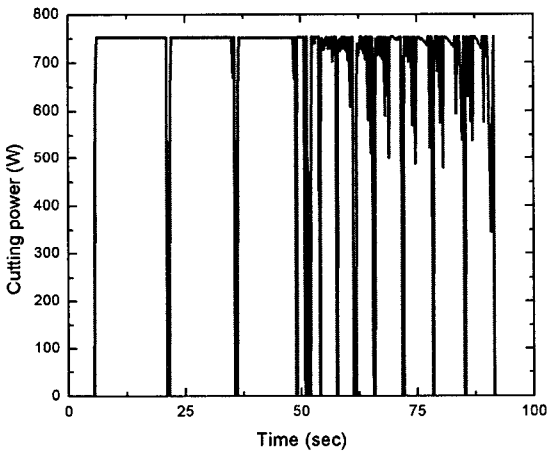


Fig. 16 Cutting power at optimum feed for the maximum allowable power of 753 W

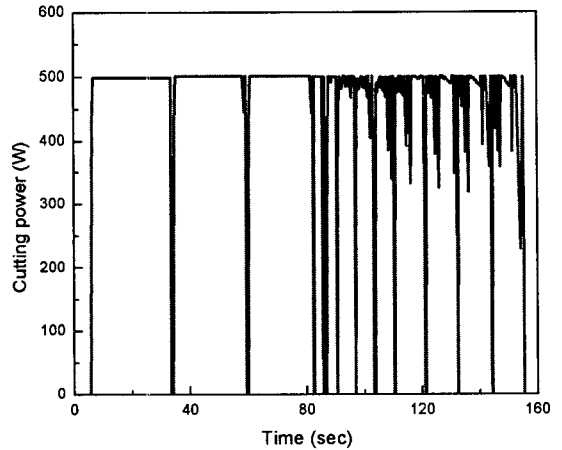


Fig. 18 Cutting power at optimum feed for the maximum allowable power of 500 W

적화 과정의 소요 시간은 3.0 GHz의 CPU가 탑재된 Intel Pentium-IV에서 1.49 sec로서 매우 짧게 나타났다. Figs. 15와 16은 최대 허용 절삭 동력이 753 W인 경우에 대해서 최적화한 이송량과 그에 대응하는 절삭 동력의 예측 결과를 보여주고 있으며, Figs. 17과 18은 최대 허용 절삭 동력이 753 W의 약 2/3 수준인 500 W인 경우에 대해서 최적화한 이송량과 그에 대응하는 절삭 동력의 예측 결과를 보여주고 있다. 특히 최대 허용 절삭 동력이 753 W와 500 W인 경우에 대해서 각각 최적화된 이송량으로 절삭을 수행하였을 때의 가공 시간은 최적화 이전의 가공 시간인 191.0 sec의 48.0% 수준인 91.7 sec와 81.4% 수준인 155.6 sec로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한

사실로부터 본 연구에서 제안한 선삭 공정에서의 이송량 최적화 방법은 CNC 선반의 생산성 향상에 크게 기여할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 CNC 선반의 황삭 공정에 대한 고능률 가공을 구현하기 위해서 가상 가공 기법을 토대로 산정한 절삭 동력이 최대 허용 수준을 유지하도록 이송량을 변화시키는 ‘고능률 선삭 가공을 위한 가상 가공 기반의 이송량 최적화 방법’을 제안하였고, 그 유용성을 검토하였다. 그리고 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 이송량의 최적화 결과에 대한 정밀도를 유

지하기 위해서 미소 이송 경로에서의 공구 이송 거리가 1 mm 이하가 되도록 이송 경로를 보간하였고, 그 미소 이송 경로를 토대로 공구의 미소 절삭 영역을 산정하였다.

(2) 공구의 미소 절삭 영역과 공작물 형상 사이의 기하학적 불리안 연산을 통해서 선삭 공정에서의 절삭 매개변수들을 산정하였고, 그 결과를 토대로 최대 허용 절삭 동력에 대한 미소 이송 경로에서의 최적 이송량을 결정하였다.

(3) 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 매우 작은 이웃한 미소 이송 경로들을 서로 통합함으로써 최적화된 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다.

(4) 비절삭 저항 관계식을 토대로 구축한 절삭력 및 절삭 동력의 해석 모델은 절삭 실험 모델에 대한 절삭력의 측정값과 예측값이 잘 일치한다는 사실로부터 그 신뢰성이 확인되었다.

(5) 본 연구에서 제안한 ‘고능률 선삭 가공을 위한 가상 가공 기반의 이송량 최적화 방법’은 최적화 과정에 소요되는 계산 시간이 매우 짧고, 고능률 가공에 매우 효과적인 것으로 나타났다. 특히 초기 NC 프로그램의 외경 선삭 공정에 대한 최대 절삭 동력을 최대 허용 절삭 동력으로 하는 최적화 사례에서는 가공 시간이 48.0 % 수준으로 크게 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Toutant, R., Balakrishnan, S., Onyshko, S., and Popplewell, N., 1993, “Feedrate Compensation for Constant Cutting Force Turning,” *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 13, No. 6, pp. 44-47.
- (2) Tarng, Y. S. and Wang, Y. S., 2005, “A New Adaptive Controller for Constant Turning Force,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 211-216.
- (3) Harder, L. and Isaksson, A. J., 1997, “Force Control in Turning Based on Robust PI Controller Design,” *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 211, No. 2, pp. 165-175.
- (4) Chung, J. G. and Seo, Y. D., 1998, “Application of Fuzzy Controller for Cutting Force Control in CNC Lathe,” *Bulletin of the Institute of Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 513-538.
- (5) Hsieh, C. H., Chou, J. H., and Wu, Y. J., 2002, “Optimal Predicted Fuzzy PI Gain Scheduling Controller of Constant Turning Force Systems with Fixed Metal Removal Rate,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, No. 10, pp. 714-721.
- (6) Pak, C. H., Hong S. H., Lee B. H., and Huh K. S., 2002, “Unmanned Turning Process Control Based on Spindle-Motor Power Characteristics,” *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 7, pp. 1446-1452.
- (7) <http://www.cgtech.com/usa/vericut-optimization-vs-adaptive-controls/>
- (8) Watt, A., 2000, *3D Computer Graphics*, Addison-Wesley.
- (9) Möller, T. A. and Haines, E., 2002, *Real-Time Rendering*, A.K. Peters Ltd.
- (10) Sandvik Coromant, 2006, “Metal Cutting Technical Guide,” *Metalworking Products*.
- (11) <http://www.aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=128&pageid=2144416321>
- (12) http://ensoft21.co.kr/sub3_3.htm