

# 선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 이송량의 최적화

강유구\* · 조재완\* · 김석일†

## Feed Optimization for High-Efficient Machining in Turning Process

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

**Key Words :** Turning Process (선삭 공정), High-Efficient Machining (고능률 가공), Feed (이송량), Optimization (최적화), Cutting Power (절삭 동력)

### Abstract

High-efficient machining, which means cutting 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 the cutting power regulation was proposed to realize the high-efficient machining in turning process. 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.

선삭 공정에서는 이송량이 클수록 공구 및 공작물의 파손, 제품의 품질 저하 등이 발생할 가능성도 높아지기 때문에 실제 절삭 가공에서는 비교적 작은 이송량으로 가공하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 이송량의 감소는 가공 시간의 증가를 초래하고, 그 결과로 생산성이 낮아지게 된다. 이

러한 문제점을 해결하기 위해서는 무엇보다도 일정 수준의 절삭 동력이 소모되도록 이송량을 산정하고, 그것을 토대로 NC 프로그램을 생성하는 것이 필요하다.<sup>(1)</sup> 이러한 형태의 이송량의 최적화는 가공 시간의 단축 외에도 과도한 절삭력의 방지, 공구의 수명 증가 등과 같은 효과를 주게 된다.

본 연구에서는 CNC 선반의 황삭 공정에 대한 고능률 가공을 구현하기 위해서 공구의 형상, 공작물의 재질, 공작물의 절삭 부위 등과 같은 절삭 상황을 토대로 산정한 절삭 동력이 최대 허용 수준을 유지하도록 이송량을 변화시키는 이송량의 최적화 방법을 제안하였다. 이를 위해서 먼저 선삭 공정에 대한 절삭 동력 해석 모델을 구축하였고, 미소 공구 경로에 대한 공구와 공작물 사이의 불리안 연산(Boolean operation)<sup>(2-4)</sup>을 통해서 공구에 의해서 제거되는 공작물 부위를 계산하였다. 그리고 최대 허용 절삭 동력에 대한 절삭 동력 해석 모델의 역 연산 과정을 통해서 미소 공구 경로에서의 이송량을 최적화하였고, 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 매우 작은 이웃한 미소 공구 경로들을 재통합함으로써 최적화된 NC 프로그램을 생성하였다. 특히 본 연구에서 제안한

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

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

‘선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 이송량의 최적화 방법’은 일련의 가공 실험과 가상 가공을 통해서 얻은 가공 시간, 이송량, 절삭 동력 등에 대한 비교 분석을 통해서 그 유용성이 검증되었다.

## 2. 선삭 공정의 절삭 동력 해석

Fig. 1 은 공작물의 회전과 공구의 이송에 의해서 가공이 수행되는 선삭 공정의 일반적인 형태를 보여주고 있다. 미소 공구 경로에 대한 절삭 면적  $A_c$  ( $\text{mm}^2$ )는 공구와 공작물 형상 사이의 불리안 연산을 통해서 산정할 수 있으며, 미소 공구 경로에서의 절삭 깊이  $a_p$  (mm)는 공구의 미소 이송 거리  $d_c$ (mm)를 이용하면 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$a_p = \frac{A_c}{d_c} \quad (1)$$

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  $\kappa_r$  (deg)와 이송량  $f_n$  (mm/rev)를 이용하면 식 (2)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$h_{ex} = f_n \times \sin \kappa_r \quad (2)$$

또한 R 형태의 인서트 형상에 대한 최대 칩 두께  $h_{ex}$ 는 Fig. 3(b)에서의 절삭 깊이  $a_p$ 와 이송량  $f_n$ 를 이용하면 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.<sup>(5)</sup>

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

비절삭 저항  $k_c$  ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )는 최대 칩 두께  $h_{ex}$ , 공구의 접근 각도  $\kappa_r$ 과 공칭 비절삭 저항(0.4 mm의 칩 두께에 대한 비절삭 저항)  $k_{c0.4}$ 에 의해서 식 (4)와 같은 형태로 주어진다.<sup>(5)</sup>

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

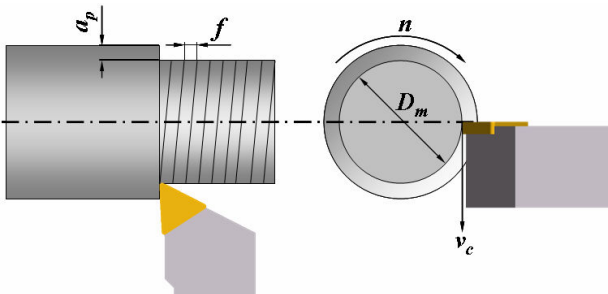


Fig. 1 Lathe operation

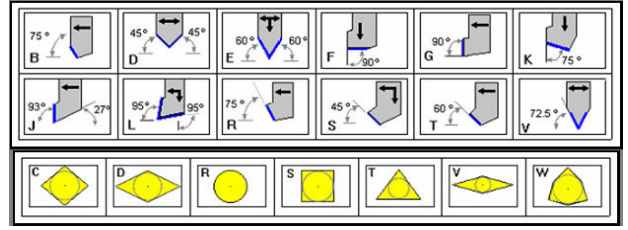
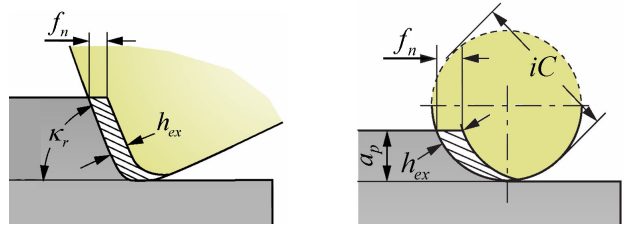


Fig. 2 Holder and Insert shapes



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

Fig. 3 Maximum chip thickness

비절삭 저항  $k_c$ 는 단위 면적 당의 절삭력이라는 의미와 함께 단위 체적 당의 절삭 에너지라는 의미도 가지고 있다. 그리고 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.

$$F_c = k_c \times a_p \times f_n \quad (5)$$

$$P_c = \frac{v_c \times F_c}{60} \quad (6)$$

## 3. 이송량 및 NC 프로그램의 최적화

### 3.1 공구 및 공작물의 설정

Fig. 4 는 선삭 공정의 절삭 동력을 해석하기 위해서 필요한 공구 DB와 공작물 DB의 개략도를 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 구축하

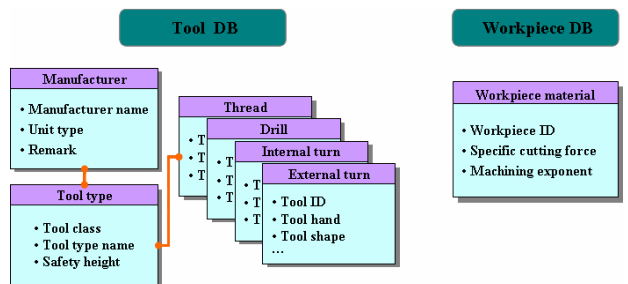


Fig. 4 Databases for tool and workpiece

였다. 그리고 공작물 DB는 공작물의 재질, 공칭 비절삭 저항, 가공지수 등과 같은 공작물 정보들을 관리하고 검색하기 위해서 구축하였다.

### 3.2 이송량의 최적화

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

선삭 공정에서의 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 대입하면 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

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

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.

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

### 3.3 NC 프로그램의 최적화

Fig. 5는 초기 NC 프로그램으로부터 공구 경로의 생성, 공구 경로의 보간에 의한 미소 공구 경로의 생성, 미소 공구 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 공구 경로를 생성한 후 하나의 NC 블록(NC block)에서의 공구 이송량이 1 mm 이하가 되도록 공구 경로를 보간함으로써 미소 공구 경로를 생성하였다. 그리고 미소 공구 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 공구 경로에서의 최적 이송량을 결정하였다. 특히 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 매우 작은 이웃한 미소 공구 경로를 서로 통합함으로써 최적화된 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다.

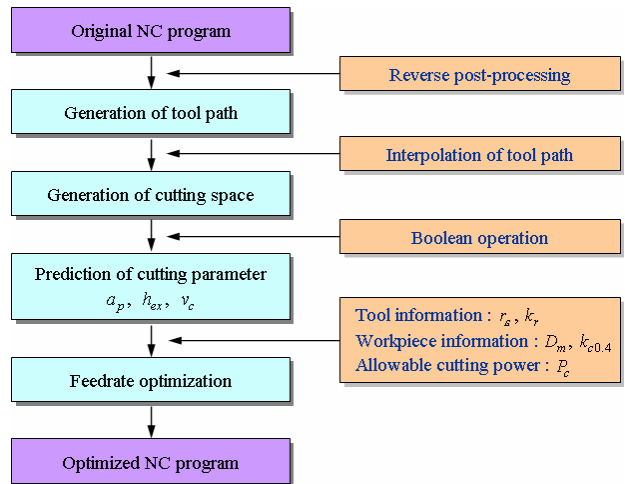


Fig. 5 Optimization process of NC program

## 4. 실험 및 고찰

### 4.1 실험 장치

Fig. 6은 CNC 선반(대우중공업의 Puma 150G), 공구 동력계(Kistler의 9265B), 전하 증폭기(Kistler의 5807A), 그리고 DAQ 보드(National Instrument의 PCI-6250)로 구성된 절삭 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이고, Fig. 7은 공구 동력계를 CNC 선반에 장착한 모습을 보여주고 있다.

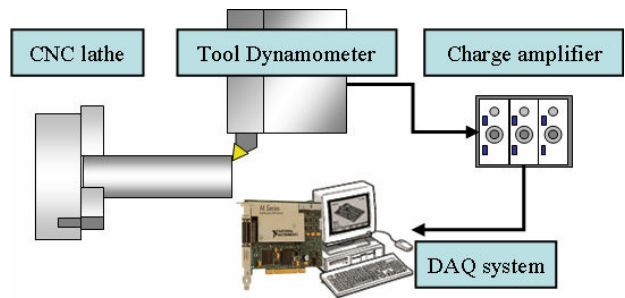


Fig. 6 Schematic diagram for experimental setup

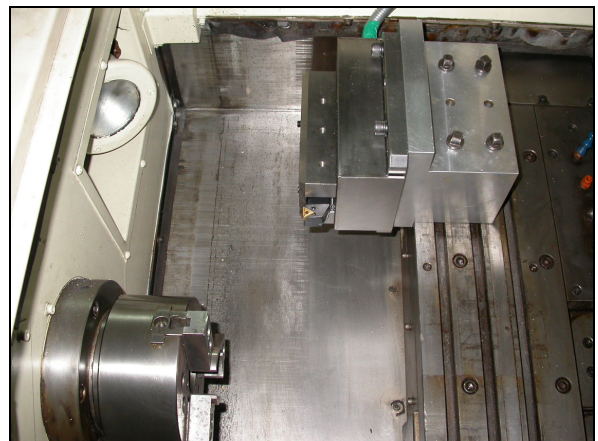


Fig. 7 Tool dynamometer setup

공작물의 재질은 기계 구조용 탄소강인 SM45C 이다. 본 연구에서는 두 번의 절삭 실험을 수행하였는데, 첫 번째 실험의 공구 홀더로는 공구의 접근 각도가 공작물과 90°를 이루는 PTGNL2525M16 을 사용하였고, 두 번째 실험의 공구 홀더로는 접근 각도가 93°인 WTJNL2525M16 을 사용하였다. 그리고 인서트는 TT3500 소재의 TNMG160408(대구턱)을 사용하였다.

#### 4.2 실험 방법

Figs. 8 과 9 는 본 연구에서 절삭 실험한 두 모델들을 보여주고 있는데, 이러한 절삭 실험 모델들에 대한 NC 프로그램은 (주)이엔소프트의 CNC 선반용 CAD/CAM 시스템인 EnS-Turn<sup>(7)</sup>을 이용하여 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 10 mm 씩 절삭을 수행하였고,<sup>(8)</sup> 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. 공구 동력계에서 감지되는 절삭력은 DAQ 보드를 통해서 0.01 sec 단위의 샘플링 주기를 가지고 측정되었다.

#### 4.3 실험 결과 및 고찰

공작물의 재질이 SM45C 인 경우의 공칭 비절삭

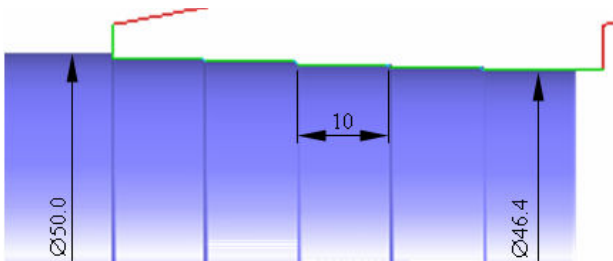


Fig. 8 First test model

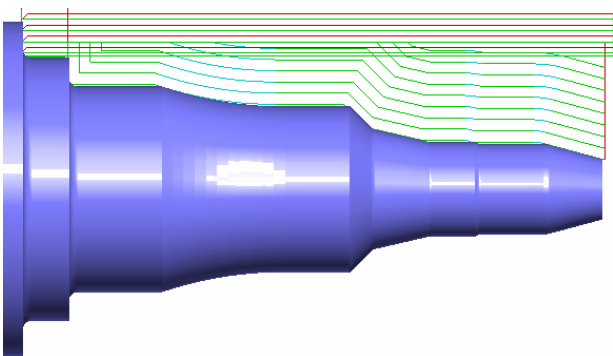


Fig. 9 Second test model

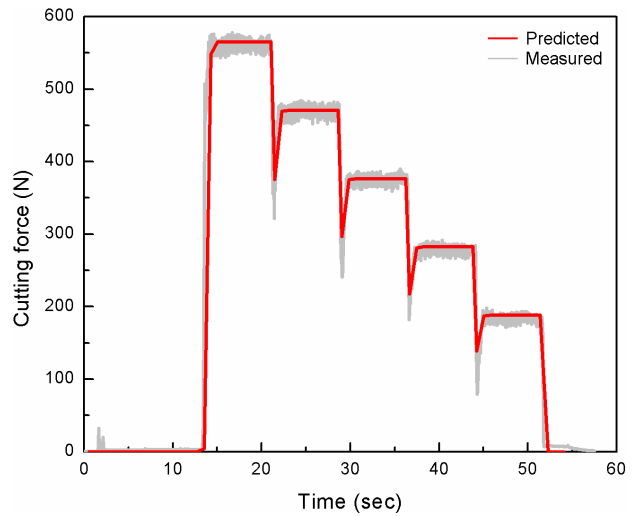


Fig. 10 Comparison of measured and predicted cutting forces for the first test model

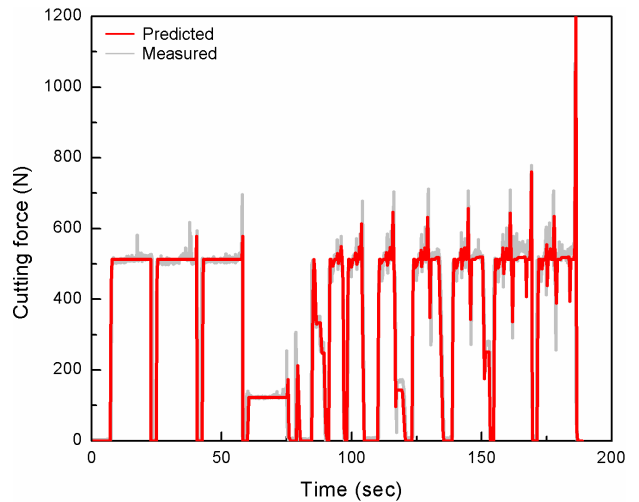


Fig. 11 Comparison of measured and predicted cutting forces for the second test model

저항  $k_{c0.4}$ <sup>(5)</sup>가 2,100 N/mm<sup>2</sup> 이라는 사실을 이용하면 식 (4)와 (5)로부터 절삭력을 예측할 수 있다. Figs. 10 과 11 은 Figs. 8 과 9 에 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. 12 는 Fig. 9 에 제시한 두 번째 실험 모델에 대한 절삭 동력을 예측한 결과를 보여주고 있는데, 이 경우의 최대 절삭 동력은 1,175 W 로 최종 윤곽 가공 구간에서 공구가 공작물의 벽면과 접촉할 때 발생하였다. 그러나 그 경우를 제외한 나머지

구간에서의 최대 절삭 동력은 753 W 이며, 첫 번째 외경 가공 구간에서 발생된다. 따라서 본 연구에서는 최대 허용 절삭 동력을 753 W 로 설정하고, 이송량의 상한과 하한을 기존 이송량 0.2 mm/rev 의 1,000 %와 5 %인 2 mm/rev 와 0.01 mm/rev 로 하는 이송량의 최적화를 수행하였다. 특히 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 이송량의 상한 2 mm/rev 의 1 %에 해당하는 0.02 mm/rev 이하인 이웃한 미소 공구 경로들을 서로 재통합함으로써 최적 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다. 이러한 개념에 의해서 138 개의 NC 블록들로 구성된 초기 NC 프로그램은 미소 공구 경로의 재통합 과정을 거쳐서 524 개의 NC 블록들로 구성된 최적 NC 프로그램으로 변환되었으며, 최적화 과정의 소요 시간은 3.0 GHz 의 CPU 가 탑재된 Intel Pentium-IV 에서 1.49 sec 로서 매우 짧게 나타났다.

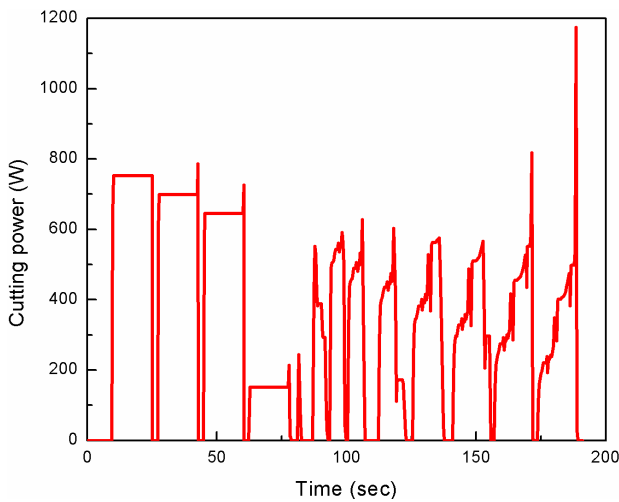


Fig. 12 Cutting power of the second test model

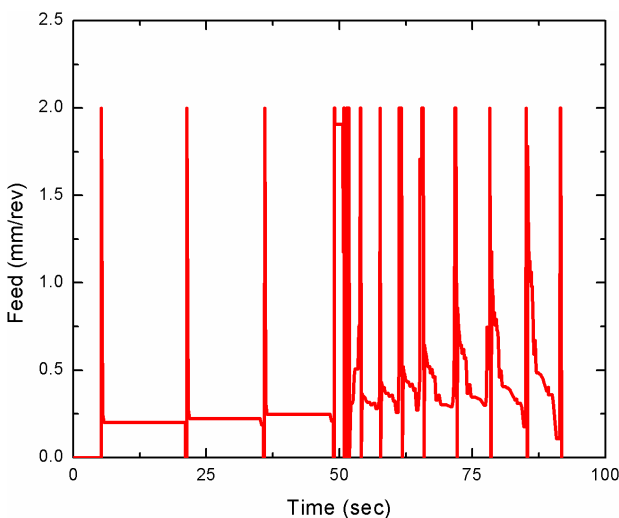


Fig. 13 Optimum feed for the maximum allowable power of 753 W

Figs. 13 과 14 는 최대 허용 절삭 동력이 753 W 인 경우에 대해서 최적화된 이송량과 그에 대응하는 절삭 동력의 예측 결과를 보여주고 있으며, Figs. 15 와 16 은 최대 허용 절삭 동력이 500 W 인 경우에 대해서 최적화된 이송량과 그에 대응하는 절삭 동력의 예측 결과를 보여주고 있다. 특히 최대 허용 절삭 동력이 753 W 와 500 W 인 경우에 대해서 각각 최적화된 이송량으로 절삭을 수행하였을 때의 가공 시간은 최적화 이전의 가공 시간인 191.0 sec 의 48.0 % 수준인 91.7 sec 와 81.4 % 수준인 155.6 sec 로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 사실로부터 본 연구에서 제안한 선삭 공정에서의 이송량의 최적화 방법은 CNC 선반의 생산성 향상에 크게 기여할 수 있음을 알 수 있다.

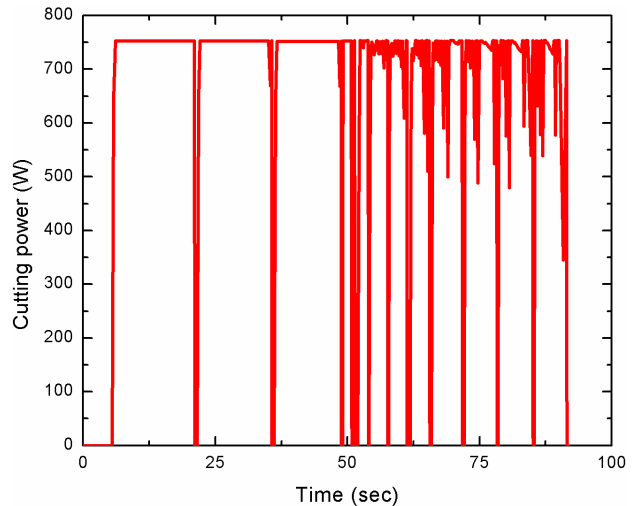


Fig. 14 Cutting power at optimum feed for the maximum allowable power of 753 W

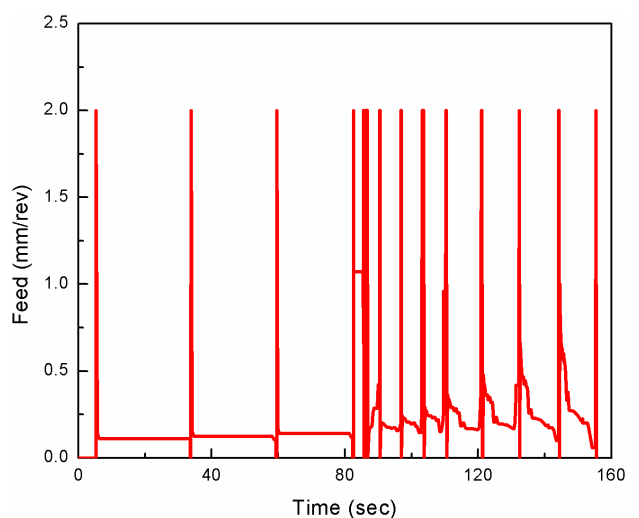


Fig. 15 Optimum feed for the maximum allowable power of 500 W

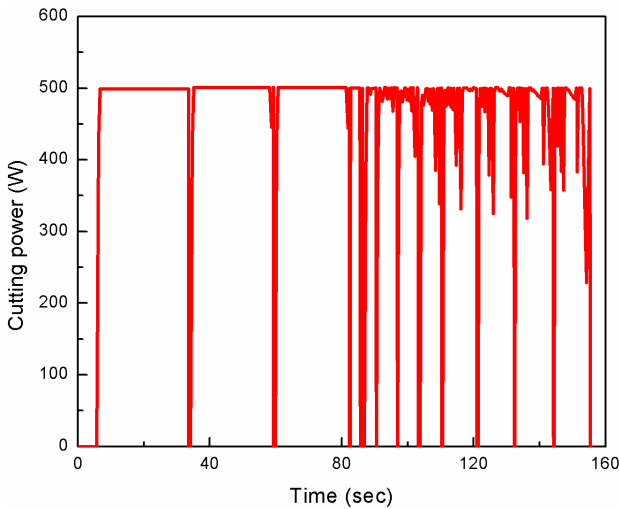


Fig. 16 Cutting power at optimum feed for the maximum allowable power of 500 W

## 5. 결론

본 연구에서는 CNC 선반의 황삭 공정에 대한 고능률 가공을 구현하기 위해서 공구의 형상, 공작물의 재질, 공작물의 절삭 부위 등과 같은 절삭 상황을 토대로 산정한 절삭 동력이 최대 허용 수준을 유지하도록 이송량을 변화시키는 ‘선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 이송량의 최적화 방법’을 제안하였고, 그 유용성을 검토하였다. 그리고 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 이송량의 최적화를 위해서 미소 공구 경로에서의 공구 이송량이 1 mm 이하가 되도록 공구 경로를 보간하였고, 그 미소 공구 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 공구 경로에서의 최적 이송량을 결정하였다.

(3) 공구의 이송 방향이 일치하면서 이송량의 차이가 매우 작은 이웃한 미소 공구 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 ‘선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 이송량의 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) Kim, S. I. and Cho, J. W., 2005, “Cutting Power Based Feedrate Optimization for High-Efficient Machining,” *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 2, pp. 333~340.
- (2) Watt, A., 2000, *3D Computer Graphics*, Addison-Wesley.
- (3) Möller, T. A. and Haines, E., 2002, *Real-Time Rendering*, A.K. Peters Ltd.
- (4) Cho, J. W. and Kim, S. I., 2000, “Development of the CAD/CAM System for CNC Universal Cylindrical Grinding Machines,” *Trans. of the SCCE*, Vol. 5, No. 4, pp. 312~318.
- (5) Sandvik Coromant, 2006, “Metal Cutting Technical Guide,” *Metalworking Products*.
- (6) <http://www.aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=128&pageid=2144416321>
- (7) [http://ensoft21.co.kr/sub3\\_3.htm](http://ensoft21.co.kr/sub3_3.htm)
- (8) 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.