

# 선삭 공정에서의 고능률 가공을 위한 주축 회전수의 최적화

## Spindle Speed Optimization for High-Efficiency Machining in Turning Process

조재완<sup>1</sup>, 강유구<sup>1</sup>, ✉김석일<sup>2</sup>  
Jae-Wan Cho<sup>1</sup>, You-Gu Kang<sup>1</sup> and ✉Seok-Il Kim<sup>2</sup>

1 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원 (The School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.)

2 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (The School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.)

✉ Corresponding author: sikim@kau.ac.kr, Tel: 02-300-0176

Manuscript received: 2008.4.15 / Revised: 2008.10.13 / Accepted: 2008.10.21

*High-efficiency and high-quality machining has become a fact of life for numerous machine shops in recent years. And high-efficiency machining is the most significant tool to enhance productivity. In this study, to achieve high-efficiency machining in turning process, a spindle speed optimization method was proposed based on a cutting power model. The cutting force and power were estimated from the cutting parameters such as specific cutting force, feed, depth of cut, and spindle speed. The time delay due to the acceleration or deceleration of spindle was considered to predict a more accurate machining time. Especially, the good agreement between the predicted and measured cutting forces showed the reliability of the proposed optimization method, and the effectiveness of the proposed optimization method was demonstrated through the simulation results associated with the productivity enhancement in turning process*

Key Words: High-Efficiency Machining (고능률 가공), Turning Process (선삭 공정), Spindle Speed (주축 회전수), Optimization (최적화), Cutting Power (절삭 동력)

### 기호설명

$v_c$  = Cutting speed

$D_m$  = Machined diameter

$n$  = Spindle speed

$A_c$  = Cutting area

$a_p$  = Cutting depth

$d_c$  = Tool path length

$h_{ex}$  = Maximum chip thickness

$f_n$  = Feed per revolution

$\kappa_r$  = Approach angle

$i_C$  = Tool nose diameter

$c_h$  = Coefficient of  $h_{ex}$

$k_{c0.4}$  = Specific cutting force for chip thickness 0.4mm

$k_c$  = Specific cutting force

$F_c$  = Cutting force

$P_c$  = Cutting power

### 1. 서론

국내외적으로 무한 경쟁 시대가 도래하면서 제조업체들의 경영 환경이 점점 악화되고 있다. 제조업체들은 이런 절박한 상황을 돌파하기 위해서 무엇보다도 납기 단축, 원가 절감 및 품질 향상을 도모하는 데 주력하고 있다. 그 결과로 생산성 향상과 직결된 공작기계의 고속화가 지속적으로 추구하고 있고, 최근에는 이러한 하드웨어적인 고속화와 함께 최적의 절삭 조건을 설정할 수 있는 소

소프트웨어적인 고속화에 대한 관심도 높아지고 있다.

현재는 국내에도 CAD/CAM 소프트웨어가 많이 보급되어서 NC 프로그램을 얻는 데 소요되는 시간은 많이 단축되었다. 그러나 생산성에 매우 큰 영향을 미치는 이송량, 절삭 깊이, 주축 회전수와 같은 절삭 조건들의 선정은 많은 경우에 작업자의 경험과 지식에 의존하고 있는 것이 현실이다. 따라서 공작기계의 성능을 효과적으로 활용하면서 생산성을 향상시키기 위해서는 가공 공정 중에 최대 허용 절삭 동력을 유지할 수 있도록 절삭 조건을 자동 산정하고, 그것을 토대로 NC 프로그램을 최적화하는 것이 필요하다.

그 동안 선삭 공정의 경우에는 절삭 상태의 계측 정보를 이용해서 절삭력을 일정하게 제어하기 위한 연구가 적응 제어 기법,<sup>12</sup> 퍼지 제어 기법,<sup>3,5</sup> 견인 제어 기법<sup>6</sup> 등을 토대로 수행되었다. 그러나 이러한 방법들을 실제 CNC 선반에 적용하기 위해서는 센서, 전용 제어기 등과 같은 하드웨어들을 설치해야 한다는 점, 기계 별로 전용 제어기의 설정 조건을 별도로 조정해야 한다는 점 등과 같은 문제들이 있다.<sup>7</sup> 따라서 최근에 이와 같은 문제들을 해소하기 위한 방안으로 소프트웨어적으로 예측한 절삭력이나 절삭 동력을 이용해서 공구의 이송 운동을 제어하는 방법이 제시되었다.<sup>10</sup>

본 연구에서는 선삭 가공의 고능률화와 가공 표면의 균질화를 도모하기 위해서 최대 허용 절삭 동력과 일정 이송량의 사용을 전제로 하는 주축 회전수의 최적화 방법을 제안하였다. 공구에 의한 공작물의 절삭 부위는 공구 형상과 공작물 형상 사이의 불리안 연산(Boolean operation)<sup>8,9</sup>을 통해서 도출하였으며, 특히 시시각각으로 변하는 절삭 부위를 보다 정확하게 도출하기 위해서 각각의 이송 경로는 여러 개의 미소 이송 경로들로 분할하였다. 그리고 공작물 재질, 공구 제원, 절삭 깊이, 이송량 등을 토대로 구성된 절삭 동력 해석 모델의 역연산 과정을 통해서 최대 허용 절삭 동력에 대응하는 미소 이송 경로에서의 최적 주축 회전수를 산정하였다. 또한 공구의 이송 방향이 일치하면서 주축 회전수의 차이가 허용 편차 이내인 인접한 미소 이송 경로들을 통합함으로써 NC 프로그램을 최적화하였으며, 가공 시간의 정확한 예측을 위해서 주축 회전수의 변동에 기인한 시간 지연 현상을 고려하였다. 본 연구에서 제안한 최적화 방법의 유용성은 절삭 동력과 가공 시간의 분석을 통

해서 검증하였다.

## 2. 선삭 공정의 절삭 동력 해석

### 2.1 절삭 속도와 절삭 깊이

일반적인 선삭 공정은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 공작물의 회전과 공구의 이송에 의해서 수행된다. 선삭 공정에서의 절삭 속도  $v_c$  (m/min)는 공작물의 직경  $D_m$  (mm)과 주축 회전수  $n$  (rpm)를 이용하면 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$v_c = \frac{\pi D_m n}{10^3} \quad (1)$$

공구에 의한 공작물의 절삭 부위는 지속적으로 변하기 때문에 절삭 상태를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 초기 NC 프로그램에 의해서 주어지는 공구의 이송 경로를 여러 개의 미소 이송 경로로 분할하는 것이 필요하다. 그리고 공구의 미소 이송 경로에 대응하는 공구의 스윙 영역과 공작물의 단면 형상 사이의 교집합을 이용하면 미소 이송 경로에 대한 절삭 면적  $A_c$  (mm<sup>2</sup>)를 산정할 수 있는데, 미소 이송 경로에 대한 절삭 깊이  $a_p$  (mm)는 미소 이송 경로의 길이  $d_c$  (mm)와 절삭 면적으로부터 아래와 같이 주어진다.<sup>10</sup>

$$a_p = \frac{A_c}{d_c} \quad (2)$$

### 2.2 최대 칩 두께

선삭 공정에서 일반적으로 사용하는 인서트들의 형상은 Fig. 2에서 볼 수 있다. 그 중에서 C, D,

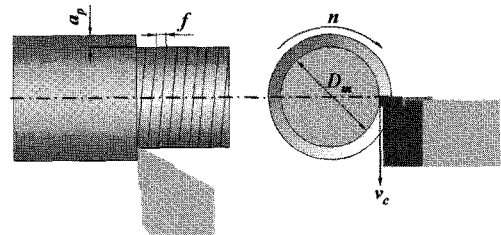


Fig. 1 Lathe operation<sup>10</sup>

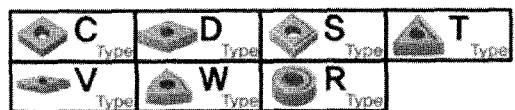
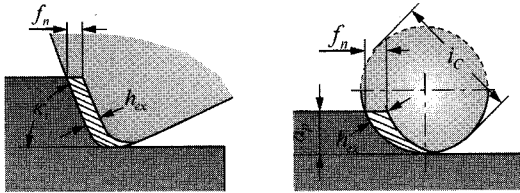


Fig. 2 Insert shapes



(a) Insert shape: C, D, S, T, V, W (b) Insert shape: R  
Fig. 3 Maximum chip thickness<sup>10</sup>

S, T, V 및 W 형 인서트의 최대 칩 두께  $h_{ex}$ (mm)는 Fig. 3(a)에서와 같이 이송량  $f_n$  (mm/rev)과 접근 각도  $\kappa_r$ (deg)에 의해서 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.<sup>10</sup>

$$h_{ex} = f_n \sin \kappa_r \quad (3)$$

또한 R 형 인서트의 최대 칩 두께  $h_{ex}$ 는 Fig. 3(b)에서와 같이 이송량  $f_n$ , 절삭 깊이  $a_p$ , 그리고 선단 직경  $i_c$  (mm)에 의해서 식 (4)와 같이 주어진다.<sup>11</sup>

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

따라서 최대 칩 두께  $h_{ex}$ 는 다음과 같이 일반화해서 표시할 수 있다.

$$h_{ex} = c_h f_n \quad (5)$$

여기서 계수  $c_h$ 는 C, D, S, T, V 및 W 형 인서트인 경우에  $\sin \kappa_r$ , 그리고 R 형 인서트인 경우에

$$\sqrt{\frac{4a_p}{i_c} - \left(\frac{2a_p}{i_c}\right)^2}$$

### 2.3 비절삭 저항과 절삭 동력

0.4mm의 칩 두께에 대한 비절삭 저항을 의미하는 공칭 비절삭 저항  $k_{c0.4}$  (N/mm<sup>2</sup>), 그리고 최대 칩 두께  $h_{ex}$ 에 의해서 비절삭 저항  $k_c$  (N/mm<sup>2</sup>)를 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>11</sup>

$$k_c = k_{c0.4} \left[ \frac{0.4}{h_{ex}} \right]^{0.29} = k_{c0.4} \left[ \frac{0.4}{c_h f_n} \right]^{0.29} \quad (6)$$

비절삭 저항  $k_c$ 는 단위 면적당 절삭력을 의미하기 때문에 선삭 공정에서의 절삭력  $F_c$  (N)는 비

절삭 저항  $k_c$ , 절삭 깊이  $a_p$ , 그리고 이송량  $f_n$ 에 의해서 식 (7)과 같은 형태로 주어진다.

$$F_c = k_c a_p f_n = k_{c0.4} a_p f_n \left[ \frac{0.4}{c_h f_n} \right]^{0.29} \quad (7)$$

또한 절삭력  $F_c$ 와 절삭 속도  $v_c$ 의 곱으로 표현되는 선삭 공정에서의 절삭 동력  $P_c$  (W)는 다음의 형태로 구성할 수 있다.

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

## 3. 주축 회전수와 NC 프로그램의 최적화

### 3.1 공구와 공작물 정보의 DB화

선삭 공정에서의 절삭 동력을 해석하기 위해서는 공구와 공작물에 대한 다양한 정보들이 필요하다. Fig. 4는 공구 제조업체, 접근 각도, 절삭날 길이, 선단 각도, 선단 반경, 홀더 길이, 홀더 폭 등과 같은 공구 정보들을 체계적으로 관리하기 위해서 구축한 공구 DB의 형태를 보여주고 있으며, 또한 Fig. 5는 공작물의 재질, 공칭 비절삭 저항, 가공 지수 등과 같은 공작물 정보들을 관리하기 위해서 구축한 공작물 DB의 형태를 보여주고 있다.

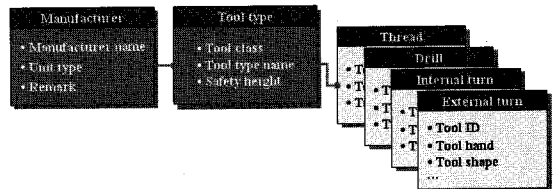


Fig. 4 Tool databases

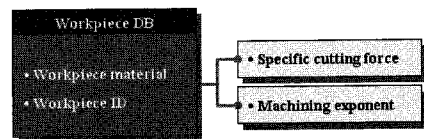


Fig. 5 Workpiece databases

### 3.2 주축 회전수의 최적화

본 연구에서 제안한 CNC 선반의 고능률 선삭을 위한 주축 회전수의 최적화 방법은 가공 표면의 균질화를 도모하기 위해서 이송량을 일정하게

유지하면서 공작물 재질, 공구 제원, 절삭 깊이, 이송량 등과 같은 정보들을 이용해서 예측한 절삭 동력이 최대 허용 절삭 동력을 상회하지 않도록 주축 회전수를 변화시키는 개념에 토대를 두고 있다. 따라서 최적의 주축 회전수를 산정하기 위해서는 식 (8)의 형태로 주어지는 선삭 공정에서의 절삭 동력 해석 모델에 대한 역 연산 과정이 필요하다.

식 (8)은 선삭 공정에서의 절삭 동력이 절삭 속도의 함수라는 것을 보여준다. 따라서 식 (8)로부터 절삭 속도가 절삭 동력의 함수로 표현되는 역 함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$v_c = \frac{60P_c}{k_{c0.4} a_p f_n \left[ \frac{0.4}{c_h f_n} \right]^{0.29}} \quad (9)$$

또한 절삭 속도와 주축 회전수의 관계를 나타내는 식 (1)을 식 (9)에 대입해서 정리하면 식 (10)과 같이 주축 회전수를 절삭 동력의 함수로 나타낼 수 있는데, 이 관계식을 토대로 선삭 공정에서의 허용 절삭 동력에 대응하는 최적의 주축 회전수를 산정할 수 있다.

$$n = \frac{60,000P_c}{\pi D_m k_{c0.4} a_p f_n \left[ \frac{0.4}{c_h f_n} \right]^{0.29}} \quad (10)$$

### 3.3 NC 프로그램의 최적화

본 연구에서는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 초기 NC 프로그램으로부터 공구의 이송 경로를 도출하고, 그 이송 경로를 보간함으로써 미소 이송 경로를 생성한 후, 미소 이송 경로에 대한 주축 회전수의 최적화와 NC 프로그램의 최적화를 순차적으로 수행하였다.

초기 NC 프로그램으로부터 공구의 이송 경로를 도출하기 위해서 NC 프로그램의 역 후처리(reverse post-processing) 과정을 적용하였으며, 주축 회전수의 최적화 결과에 대한 정밀도를 고려해서 모든 미소 이송 경로의 거리가 1mm 이하가 되도록 이송 경로를 보간하였다. 그리고 미소 이송 경로에 대응하는 공구의 스윙 영역과 공작물의 단면 형상 사이의 불리안 연산을 통해서 절삭 매개변수들을 도출하였으며, 식 (10)을 이용해서 미소 이송 경로

마다 허용 절삭 동력에 대한 최적의 주축 회전수를 산정하였다. 그리고 최종적으로 공구의 이송 방향이 일치하면서 주축 회전수의 차이가 허용 편차 이내인 인접한 미소 이송 경로들을 통합함으로써 주축 회전수가 최적화된 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다. 이러한 과정을 통해서 생성한 NC 프로그램의 최적화 사례는 Fig. 7에 제시하였다.

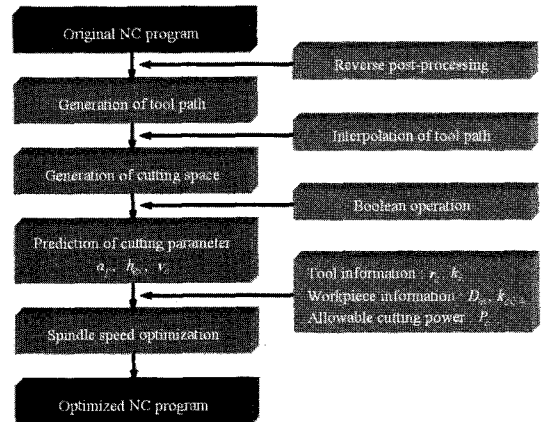


Fig. 6 NC program optimization process

<pre> {Contour Turn Along Part-Rough Process} N43 G91 M04 N44 Z:1 N45 X23.591 M08 N46 Z0.2 N47 X21.591 N48 G01 X23.456 Z-3.295 F0.2 N49 G03 X24.22 Z-6.163 I-10.939 K-2.865 N50 G01 Z-10.595 N51 G03 X24.955 Z-12.331 I-9.302 K-1.735 N52 G01 Z-15.297 N53 X25.35 Z-17.016 N54 X25.92 Z-17.305 N55 G03 Z0.2 N56 X19.52 N57 G01 X21.534 Z-3.557 F0.2 N58 G03 X22.02 Z-6.163 I-8.727 K-2.606 N59 G01 Z-10.635 N60 G09 X22.955 Z-12.331 I-7.902 K-1.636 N61 G01 Z-15.411 N62 X23.93 Z-17.521 N63 X25.92 Z-18.722 N64 G00 Z0.2 N65 X17.45 N66 G01 X19.802 Z-3.819 F0.2 N67 G03 X20.22 Z-6.163 I-8.761 K-2.343 N68 G01 Z-10.801 N69 G09 X20.955 Z-12.331 I-6.902 K-1.53 N70 G01 Z-15.525 N71 X21.709 Z-18.026 N72 X25.92 Z-20.14 N73 G00 Z0.2 N74 X15.975 N75 G01 X17.67 Z-4.075 F0.2                 </pre>	➔	<pre> {Contour Turn Along Part-Rough Process} N54 G91 M04 N55 Z:1 N56 X23.591 M08 N57 Z0.2 N58 X21.591 N59 G01 X23.216 Z-3.866 F0.206 N100 X22.941 Z-2.132 F0.25 N101 X23.456 Z-3.296 F1.372 N102 G03 X24.22 Z-6.163 I-10.939 K-2.865 F2 N103 G01 X24.22 Z-10.595 N104 G03 X24.955 Z-12.331 I-9.302 K-1.735 N105 G01 Z-15.297 N106 X25.92 Z-17.016 N107 X25.92 Z-17.305 N108 G00 Z0.2 N109 X19.52 N110 X18.804 N111 G03 X20.191 Z-1.002 F0.2 N112 X18.284 N113 X20.953 Z-2.305 N114 X14.428 N115 X21.534 Z-3.557 N116 X18.77 N117 G03 X20.049 Z-4.049 I-8.727 K-2.606 N118 X18.572 N119 X22.22 Z-6.163 I-9.304 K-1.314 N120 X19.8 N121 G01 Z-10.635 N122 X25.92 N123 G03 X20.955 Z-12.331 I-7.902 K-1.636 N124 X25.92 N125 G01 Z-15.411 N126 X20.006                 </pre>
---	---	---

Fig. 7 Example of NC program optimization

## 4. 최적화 방법의 적용 및 고찰

### 4.1 해석 모델의 실험적 검증

본 연구에서는 주축 회전수의 최적화를 위해서 사용한 절삭력과 절삭 동력의 해석 모델에 대한 신뢰성을 검증하기 위해서 CNC 선반(대우중공업

Puma 150G), 공구 동력계(Kistler 9265B), 전하 증폭기(Kistler 5807A), DAQ 보드(National Instrument PCI-6250) 등을 이용하여 Fig. 8 과 같은 형태의 절삭 실험 장치를 구성하였다. Fig. 9 는 절삭 시험에 사용한 CNC 선반의 모습을 보여주고 있다.

Fig. 10 은 본 연구에서 사용한 절삭 실험 모델을 보여 주고 있는데, 그 재질은 기계 구조용 탄소강 SM45C 로 공칭 비절삭 저항  $k_{c0.4}$  가 2,100 N/mm<sup>2</sup> 이다.<sup>12</sup> 절삭 실험에서 사용한 공구 홀더는 접근 각도가 93°인 J 타입의 WTJNL2525M16 이며, 인서트는 TT3500 소재의 TNMG160408(대구택)이다. 절삭 실험 모델을 가공하기 위한 초기 NC 프로그램은 ㈜이엔소프트의 CNC 선반용 CAD/CAM 시스템인 EnS-Turn<sup>13</sup> 을 이용해서 생성하였다. 그리

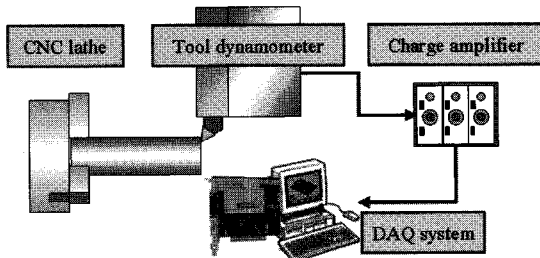


Fig. 8 Schematic diagram for experimental setup<sup>10</sup>



Fig. 9 CNC lathe

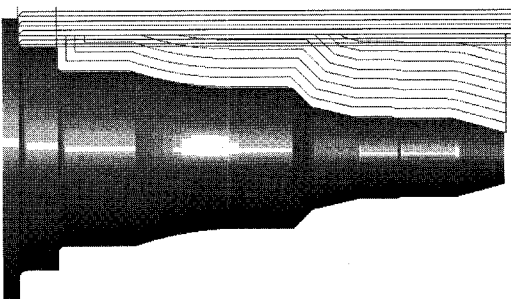


Fig. 10 Test model<sup>10</sup>

고 절삭 실험은 공작물 직경 30mm, 주축 회전수 1,000rpm, 이송량 0.2mm/rev, 절입량 1mm 의 조건에서 수행하였으며, 절삭력은 0.01sec 의 샘플링 주기로 공구 동력계를 이용해서 측정하였다.

Fig. 11 은 절삭 실험 모델에 대해서 생성한 초기 NC 프로그램으로 가공을 수행한 경우에 대한 절삭력의 측정값과 예측값을 비교한 것이다. 측정값과 예측값이 잘 일치하고 있다는 사실로부터 비절삭 저항 관계식을 토대로 구축한 식 (7)과 (8)의 형태인 절삭력과 절삭 동력의 해석 모델이 높은 신뢰성을 갖는다는 점을 확인할 수 있다. 그리고 초기 NC 프로그램으로 가공을 수행한 경우의 가공 시간은 191.0 sec 인 것으로 나타났다.

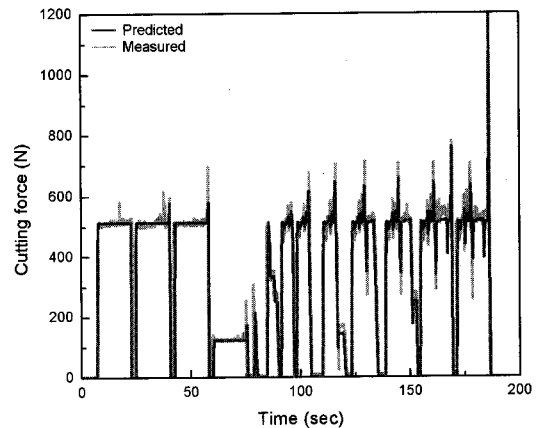


Fig. 11 Comparison of the measured and predicted cutting forces for the initial NC program<sup>10</sup>

#### 4.2 주축계의 가감속 특성과 시간 지연

본 연구에서 제안한 주축 회전수의 최적화 방법은 가공 표면의 균질화를 도모하기 위해서 이송량을 일정하게 유지한 상태에서 주축 회전수를 변화시키는 개념을 사용하기 때문에 필연적으로 주축계의 가감속 특성에 기인한 시간 지연 현상을 야기하게 된다. 이러한 현상은 주축 회전수를 일정하게 유지한 상태에서 이송량을 변화시키는 개념<sup>10</sup> 을 사용하는 경우보다 매우 두드러지게 나타난다. 따라서 가공 시간의 측정값과 예측값 사이의 오차를 줄이기 위해서는 주축계의 가감속 특성을 고려한 가공 시간의 예측이 필요하다.

NC 프로그램 상에서 주축 회전수의 지령값이 변화하면 주축 회전수의 지령값과 현재값 사이의 오차를 신속하게 줄이기 위해서 CNC 제어기는 주축이 최대 가감속하도록 주축 모터를 제어하게 된

다. 이러한 주축계의 최대 가속속도는 주축 모터의 최대 토크와 주축계의 회전 관성 모멘트에 의해서 결정된다.

본 연구에서는 주축계의 최대 가속속도  $\alpha_{max}$  를 주축계의 가속속 실험을 통해서 추정하였는데, 절삭 실험에서 사용한 CNC 선반의 경우에 그 값이  $0.00125/sec^2$  인 것으로 나타났다. 따라서 주축 회전수의 변화량  $\Delta\omega$  가 가공 시간의 지연  $\Delta t$  에 미치는 영향은 아래와 같은 선형적 관계로 쓸 수 있다.

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha_{max}} \times |\Delta\omega| = \frac{1}{0.00125} \times |\Delta\omega| \quad (11)$$

### 4.3 주축 회전수의 최적화 결과 및 분석

본 연구에서는 식 (7)과 (8)의 형태로 주어지는 절삭력과 절삭 동력의 해석 모델을 EnS-Turn 에 추가함으로써 가상 가공을 통해서 절삭력과 절삭 동력을 예측하였고, 그것을 토대로 주축 회전수와 NC 프로그램의 최적화를 수행하였다. 그리고 식 (11)과 같이 주어지는 주축 회전수의 변화에 의한 가공 시간의 지연 현상을 예측 결과에 반영하였다.

Fig. 12 는 EnS-Turn 을 이용해서 수행하고 있는 절삭 실험 모델에 대한 가상 가공 모습을 보여주고 있다. 최적화된 NC 프로그램은 화면 좌측, 가상 가공 결과는 화면 중앙, 그리고 절삭력과 절삭 동력의 예측 결과는 실시간 그래프 형태로 화면 하단에 표시하였다.

본 연구에서는 주축 회전수의 최적화를 수행하기 위해서 기존 연구<sup>10</sup> 에서와 같이 최대 허용 절삭 동력은 753 W 로 하고, 주축 회전수의 상한과 하한은 기존 주축 회전수 1,000rpm 의 300%와 10%인 3,000rpm 과 100rpm 으로 설정하였다. 또한 주축 회전수가 최적화된 최적 NC 프로그램의 크기를 최소화하기 위해서 공구의 이송 방향이 일치하면서 주축 회전수의 차이가 주축 회전수의 상한 3,000 rpm 의 0.1%에 해당하는 3rpm 이하인 서로 인접한 미소 이송 경로들을 통합하였다.

이러한 개념을 Fig. 10 의 절삭 실험 모델에 대해서 적용한 경우, 138 개의 NC 블록들로 구성된 초기 NC 프로그램은 715 개의 미소 이송 경로들로 세분화된 후 미소 이송 경로의 통합 과정을 거쳐서 487 개의 NC 블록들로 구성된 최적 NC 프로그램으로 변환되었다. 그리고 이와 같은 일련의 최적화 과정은 3.0GHz 의 CPU 가 탑재된 Intel

Pentium-IV 에서 1.81sec 가 소요되었다.

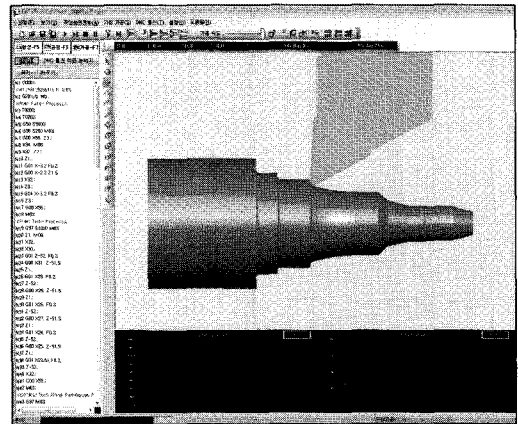


Fig. 12 Virtual manufacturing by using EnS-Turn

Fig. 13 은 최적 NC 프로그램으로 가공을 수행할 경우의 주축 회전수를 보여주고 있다. 가공이 진행될수록 공작물의 반경이 감소하기 때문에 최대 허용 절삭 동력을 소모하기 위한 주축 회전수는 전체적으로 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 절삭 과정에서 발생하는 주축 회전수의 변동은 식 (11)과 같이 표현되는 가공 시간의 지연을 야기하는데, 시간 지연을 고려한 경우의 가공 시간은 153.6sec 이고, 시간 지연을 무시한 경우의 가공 시간은 95.8sec 로 주축 회전수의 변동에 의한 가공 시간의 지연은 57.8sec 인 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 주축 회전수의 변동에 의한 가공 시간의 지연은 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 가공 시간을 올바르게 예측하기 위해서는 주축 회전수의 변동에 의한 시간 지연 현상을 반드시 고려해야 함을 확인할 수 있다.

또한 최적 NC 프로그램과 초기 NC 프로그램으로 가공을 수행한 경우의 가공 시간은 각각 153.6sec 와 191.0sec 이기 때문에 주축 회전수의 최적화를 통해서 19.6% 의 가공 시간 단축이 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 기존 연구<sup>10</sup> 에서 제시한 바와 같이 753W 의 최대 허용 절삭 동력에 대해서 이송량을 최적화한 경우의 가공 시간은 91.7 sec 이기 때문에 가공 시간 측면에서는 주축 회전수의 최적화가 이송량의 최적화보다 불리한 것으로 나타났는데, 이 차이는 그 대부분이 주축 회전수의 변동에 의한 시간 지연 현상에 기인한 것이다. 그러나 가공 표면의 균질성은 이송량을 일정하게 유지하는 주축 회전수의 최적화가 주축회전

수를 일정하게 유지하는 이송량의 최적화보다 우수하다는 장점이 있다.

Fig. 14 와 15 는 최적 NC 프로그램으로 가공을 수행할 경우의 절삭력과 절삭 동력을 나타낸 것이다. 최적 NC 프로그램에 의해서 야기되는 절삭력(Fig. 14)과 초기 NC 프로그램에 의해서 야기되는 절삭력(Fig. 11)의 형태는 두 경우의 이송량이 모두 0.2 mm/rev 로 서로 같기 때문에 전체적으로 유사하게 나타나고 있다. 최대 절삭력은 최종 윤곽 가공 구간의 마지막 순간에서 공구가 공작물의 수직 벽면과 접촉할 때 발생하며, 그 값은 1,195N 이다.

또한 절삭 과정에서 소모되는 절삭 동력이 대부분 최대 허용 절삭 동력인 753W 와 일치한다는 점으로부터 본 연구에서 제안한 주축 회전수의 최적화 방법에 의해서 고능률 선삭 가공이 효과적으로 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

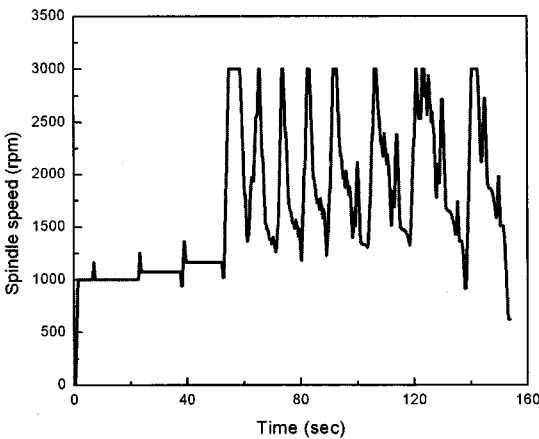


Fig. 13 Spindle speed for the optimized NC program

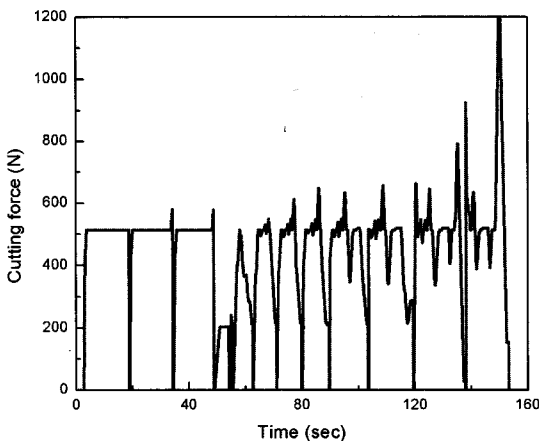


Fig. 14 Cutting forces for the optimized NC program

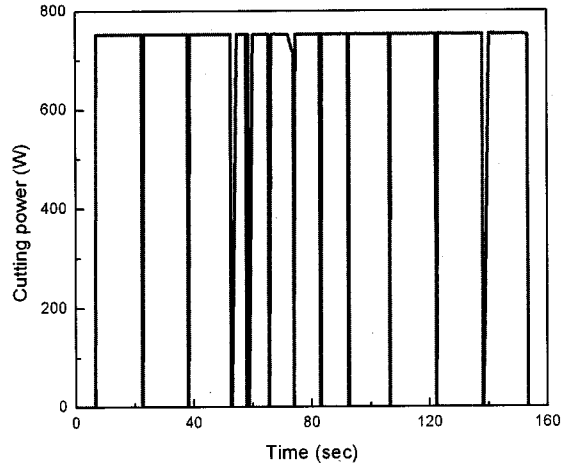


Fig. 15 Cutting power for the optimized NC program

Fig. 16 은 최대 허용 절삭 동력이 가공 시간에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 최대 허용 절삭 동력이 감소할수록 가공 시간은 급격히 증가하고 있으며, 초기 NC 프로그램으로 가공을 수행하는 경우와 비교할 때 최대 허용 절삭 동력이 550W 이상으로 설정된 경우에만 주축 회전수의 최적화를 통해서 가공 시간이 단축됨을 알 수 있다.

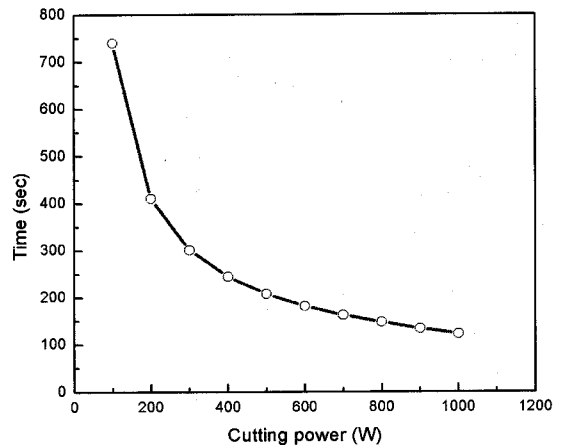


Fig. 16 Effect of the maximum allowable cutting power on the cutting time

### 5. 결론

본 연구에서는 선삭 가공의 고능률화와 가공 표면의 균질화를 구현하기 위해서 최대 허용 절삭 동력과 일정 이송량의 사용을 전제로 하는 주축 회전수의 최적화 방법을 제안하였고, 그 유용성을

검토하였다. 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 시시각각으로 변하는 절삭 상태를 보다 정확하게 예측하기 위해서 각각의 이송 경로는 1mm 이하의 미소 이송 경로들로 분할하였으며, 미소 이송 경로에 대응하는 절삭 면적은 공구의 스윙 영역과 공작물의 단면 형상 사이의 불리안 연산을 통해서 도출하였다.

(2) 공작물 재질, 공구 제원, 절삭 깊이, 이송량 등을 토대로 구성한 절삭 동력 해석 모델의 역 연산 과정을 통해서 최대 허용 절삭 동력에 대응하는 미소 이송 경로에서의 최적 주축 회전수를 산정하였다.

(3) 주축 회전수의 최적화 과정을 통해서 생성된 NC 프로그램의 크기를 최소화하기 위해서 공구의 이송 방향이 일치하면서 주축 회전수의 차이가 허용 편차 이내인 인접한 미소 이송 경로들을 통합하였다.

(4) 주축 회전수의 변동에 의한 가공 시간의 지연은 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 가공 시간의 정확한 예측을 위해서는 주축계의 가감속 특성에 기인한 시간 지연 현상을 고려해야 한다.

(5) 주축 회전수의 최적화 방법은 주축계의 가감속 특성에 기인한 시간 지연 현상 때문에 이송량의 최적화 방법보다 더 많은 가공 시간이 소요된다. 그러나 주축 회전수의 최적화 방법은 이송량의 최적화 방법보다 균질한 가공 표면을 얻을 수 있다.

(6) 주축 회전수의 최적화 방법이 선삭 가공의 고능률화를 도모할 수 있다는 사실은 절삭 과정에서 소모되는 절삭 동력이 대부분 최대 허용 절삭 동력과 일치한다는 점으로부터 확인할 수 있다.

(7) 최대 허용 절삭 동력이 감소할수록 가공 시간은 급격히 증가하기 때문에 주축 회전수의 최적화 방법을 토대로 가공 시간을 단축하기 위해서는 최대 허용 절삭 동력이 일정 수준 이상으로 설정되어야 한다.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 211-216, 2005.

3. Chung, J. G. and Seo, Y. D., "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, 1998.
4. Hsieh, C. H., Chou, J. H. and Wu, Y. J., "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, 2002.
5. Pak, C. H., Hong, S. H., Lee, B. H. and Huh, K. S., "Unmanned Turning Process Control Based on Spindle-Motor Power Characteristics," Trans. of the KSME (A), Vol. 26, No. 7, pp. 1446-1452, 2002.
6. Harder, L. and Isaksson, A. J., "Force Control in Turning Based on Robust PI Controller Design," Journal of Engineering Manufacture, Vol. 211, No. 2, pp. 165-175, 1997.
7. CGTech, <http://www.cgtech.com/usa/vericut-optimization-vs-adaptive-controls/>
8. Watt, A., "3D Computer Graphics," Addison-Wesley, 2000.
9. Möller, T. A. and Haines, E., "Real-Time Rendering," A K Peters, Ltd., 2002.
10. Kang, Y. G., Cho, J. W. and Kim, S. I., "Feed Optimization Based on Virtual Manufacturing for High-Efficiency Turning," Trans. of the KSME (A), Vol. 31, No. 9, pp. 960-966, 2007.
11. Sandvik Coromant, "Metal Cutting Technical Guide," Metalworking Products, 2006.
12. The University of Liverpool, <http://www.aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=128&pageid=2144416321>
13. E&Soft, Inc., [http://ensoft21.co.kr/sub3\\_3.htm](http://ensoft21.co.kr/sub3_3.htm)

## 참고문헌

1. Toutant, R., Balakrishnan, S., Onyshko, S. and Popplewell, N., "Feedrate Compensation for Constant Cutting Force Turning," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 13, No. 6, pp. 44-47, 1993.
2. Tarnq, Y. S. and Wang, Y. S., "A New Adaptive Controller for Constant Turning Force," The