

〈 논문 〉

고능률 가공을 위한 절삭 동력 기반의 이송 속도 최적화

김 석 일[†] · 조 재 완^{*}

(2004년 9월 30일 접수, 2004년 12월 24일 심사완료)

Cutting Power Based Feedrate Optimization for High-Efficient Machining

Seokil Kim and Jaewan Cho

Key Words : High-Efficient Machining(고능률 가공), Cutting Power(절삭 동력), Feedrate(이송 속도), Numerical Control(수치 제어), Optimization(최적화)

Abstract

Feedrate is one of the factors that have the significant effects on the productivity, quality and tool life in the cutting mechanism as well as cutting velocity, depth of cut and width of cut. In this study, in order to realize the high-efficient machining, a new feedrate optimization method is proposed based on the concept that the optimum feedrate can be derived from the allowable cutting power since the cutting power can be predicted from the cutting parameters as feedrate, depth of cut, width of cut, chip thickness, engagement angle, rake angle, specific cutting force and so on. Tool paths are extracted from the original NC program via the reverse post-processing process and converted into the infinitesimal tool paths via the interpolation process. And the novel NC program is reconstructed by optimizing the feedrate of infinitesimal tool paths. Especially, the fast feedrate optimization is realized by using the Boolean operation based on the Goldfeather CSG rendering algorithm, and the simulation results reveal the availability of the proposed optimization method dramatically reducing the cutting time and/or the optimization time. As a result, the proposed optimization method will go far toward improving the productivity and quality.

1. 서 론

공작기계를 이용한 절삭 가공의 고능률화 및 고품위화를 구현하기 위해서는 무엇보다도 공작기계, 공작물 및 공구의 특성을 고려해서 최적의 절삭 조건을 도출하는 것이 매우 중요하다. 또한 실제 절삭 과정에서 공구에 의한 공작물의 절삭 부위가 지속적으로 변하기 때문에 가공 구간에 따라서 최적의 절삭 조건은 다르게 된다. 일반적으로 전체 가공 시간에 지대한 영향을 미치는 이송 속도는 작업자의 경험이나 절삭 DB를 토대로 설정한 후, 작업자가 절삭 상태를 확인하면서 수동 조정하고 있다. 그러나 많은 시간이 소요되는 급형 가공의 경우에는 작업자가 계속해서 절삭 상태를 지켜볼 수 없고, 작업자의 시각에 의존하는 관계로 효과적인 이송 속도를 보장할 수 없게 된다. 또한

지나치게 이송 속도가 빠르면 공구 및 공작물의 파손, 제품의 품질 저하 등이 발생할 가능성이 높기 때문에 실제 절삭 가공에서는 안전성을 고려해서 되도록 낮은 이송 속도를 사용하고 있다. 이와 같이 이송 속도가 낮아지면 전체 가공 시간이 길어져서 납기도 길어지고, 생산성이 낮아지는 문제가 발생한다. 따라서 가공 구간에서의 절삭 상황을 토대로 최적의 이송 속도를 산정하고, 그것을 이용해서 NC 프로그램을 최적화하는 것은 전체 가공 시간을 줄여서 생산성을 향상시키고, 공구 및 공작물의 파손을 방지하며, 공구의 수명을 증가시키는 역할을 하게 된다. 또한 가공 부하도 균일하게 됨으로 가공면의 품질도 향상되는 효과가 있다. 특히 무인 운전을 대상으로 하는 경우에는 가공 효율의 극대화를 도모할 수 있기 때문에 최근 이송 속도의 최적화 연구가 국내외적으로 많은 주목을 받고 있다.

이송 속도를 최적화하는 대표적인 방법으로는 절삭력을 이용하는 방법,^(1,2) 재료 제거율(material removal rate)을 이용하는 방법,⁽³⁻⁵⁾ 그리고 공구 경

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

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부

로의 기하학적 형상을 이용하는 방법^(6,7) 등이 있다. 먼저 절삭력을 이용한 이송 속도의 최적화 방법은 미소 절삭력 해석 모델⁽⁸⁻¹⁰⁾을 토대로 예측한 순간 절삭력이 원하는 절삭력이 되도록 날당 이송량을 구한 후, 공구의 날수와 주축 회전수를 곱해서 이송 속도를 결정하는 개념을 사용하고 있다. 따라서 순간 절삭력을 예측할 수 있다는 점에서는 유리하지만, 순간 절삭력을 예측하기 위해서 필연적으로 계산량이 많은 미소 절삭력 해석이 반복적으로 수행되어야 하는 관계로 이송 속도의 최적화에 상당히 긴 시간이 소요되는 단점이 있다. 또한 재료 제거율을 이용한 이송 속도의 최적화 방법은 공구에 의해서 제거되는 단위 시간당의 공작물 체적이 일정하게 유지되도록 이송 속도를 변화시키는 개념을 사용하고 있는데, 특히 미국 CAM 소프트웨어 회사인 CGTech에서는 이 방법이 하드웨어를 이용한 절삭력 적응 제어 시스템보다 경제적인 측면이나 이송 속도 제어의 효율성 측면에서 우수하다고 말하지만,⁽⁵⁾ 공구의 형상, 공작물의 재질, 공작기계의 특성 등에 대한 고려가 부족하다는 단점이 있다. 마지막으로 공구 경로의 기하학적 형상을 이용한 이송 속도의 최적화 방법은 공구 경로의 변화가 완만한 경우에는 이송 속도를 증가시키고, 급격한 경우에는 이송 속도를 감소시키는 개념을 사용하고 있다. 단순히 공구 경로의 변화를 고려해서 이송 속도를 결정하기 때문에 이송 속도의 최적화에 소요되는 시간은 짧지만, 공구의 형상, 공작물의 재질, 공작물의 절삭 부위 등에 대한 고려가 부족하기 때문에 최적화 결과의 신뢰성이 상대적으로 낮다는 문제가 있다. 이상과 같이 최적화 방법들은 각각 나름대로의 장단점을 가지고 있지만, 실제 산업 현장에서 요구하는 최적화 방법은 (1) 공구의 형상, 공작물의 재질, 공작물의 절삭 부위 등과 같은 절삭 상황을 충분히 반영하고 있고, (2) 공작기계의 제원(특히 주축 모터의 출력)을 고려하고 있으며, (3) 최적화 시간이 짧아야 한다는 등의 요건들을 충족해야 한다.

따라서 본 연구에서는 공구의 형상, 공작물의 재질, 공작물의 절삭 부위 등과 같은 절삭 상황을 고려해서 산정한 절삭 동력이 밀링 머신의 허용 절삭 동력과 일치하도록 이송 속도를 변화시키는 '절삭 동력을 이용한 이송 속도의 최적화 방법'을 제안하였다. 밀링 머신에서의 가공 형태는 밀링 가공과 플런지(plunge)/드릴링 가공으로 크게 구분되기 때문에 절삭 동력 해석 모델은 두 가공 형태에 대해서 별도로 도출하였으며, 공구에 의해서 제거되는 공작물 부위의 신속한 계산을 위해서 공구의 스weep(sweep) 형상과 공작물 형상 사이의 볼

리안 연산(Boolean operation)은 Goldfeather CSG(constructive solid geometry) 렌더링(rendering) 알고리즘⁽¹¹⁾에 기반을 두고 수행하였다. 그리고 이송 속도는 허용 절삭 동력을 토대로 한 절삭 동력 해석 모델의 역 연산 과정을 통해서 미소 공구 경로에 대하여 최적화하였고, 그 결과를 이용해서 최적화된 NC 프로그램을 재생성하였다. 특히 제안한 최적화 방법의 유용성은 모의 가공에서의 실질적 시간, 이송 속도, 절삭 동력 등에 대한 비교 분석을 통해서 입증하였다.

2. 절삭 동력 해석

2.1 밀링 가공의 절삭 동력

밀링 가공에서는 이송 방향에 대한 공구와 공작물 사이의 상대 운동에 기인하여 칩 두께가 Fig. 1에서와 같이 칩 길이에 따라서 변하게 된다. 칩 두께는 절삭 방향, 절삭 폭, 날당 이송량, 맞물림 각도(engagement angle) 등에 의한 영향을 받지만, 절삭날 하나에 의해서 제거되는 칩 단면적 A_c (mm^2)는 날당 이송량 f_z (mm)와 절삭 폭 a_e (mm)를 이용하면 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$A_c = f_z \cdot a_e \quad (1)$$

여기서의 날당 이송량 f_z 는 이송 속도 v_f (mm/min), 공구 날수 z , 주축 회전수 S (rpm)에 의해서 아래와 같이 주어진다.

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot S} \quad (2)$$

그리고 칩 길이 l_c (mm)는 공구 직경 D (mm)와 맞물림 각도 ω_e (deg)에 의해서 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$l_c = \frac{\pi \cdot D \cdot \omega_e}{360} \quad (3)$$

따라서 평균 칩 두께 h_m (mm)은 칩 단면적 A_c 를 칩 길이 l_c 로 나눈 값에 대해서 절삭날 각도 κ (deg)의 영향을 반영하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

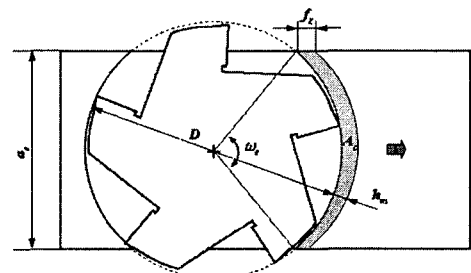


Fig. 1 Milling operation

$$h_m = \frac{360 \cdot f_z \cdot a_e \cdot \sin \kappa}{\pi \cdot D \cdot \omega_e} \quad (4)$$

비절삭 저항 k_c (N/mm^2)는 식 (4)와 같이 주어지는 평균 칩 두께 h_m , 공구의 유효 경사각(effective rake angle, 공구 경사각과 인서트 경사각의 합) γ_0 (deg), 그리고 공작물 재료의 가공 지수 m_c 와 공칭 비절삭 저항(칩 두께 1mm 일 때의 비절삭 저항) $k_{c1.1}$ (N/mm^2)으로부터 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.⁽¹²⁾

$$k_c = k_{c1.1} \cdot \left(\frac{1 - 0.01 \cdot \gamma_0}{h_m^{m_c}} \right) \quad (5)$$

식 (5)와 같이 표현되는 비절삭 저항 k_c 는 단위 절삭 면적당의 절삭력이라는 의미도 가지고 있지만, 단위 절삭 체적당의 절삭 에너지라는 의미도 가지고 있다. 결과적으로 밀링 가공의 절삭력 F_c (N)와 절삭 동력 P_c (W)는 비절삭 저항 k_c , 칩 단면적 A_c , 그리고 재료 제거율 Q (mm^3/min)에 의해서 식 (6)과 (7)의 형태로 표현할 수 있다.

$$F_c = k_c \cdot A_c \quad (6)$$

$$P_c = \frac{k_c \cdot Q}{6 \times 10^4} \quad (7)$$

2.2 플런지/드릴링 가공의 절삭 동력

플런지 가공은 공구의 오버행(overhang)이 커서 진동 위험이 있거나 공작물이 약하게 고정되는 경우에 최근 보편적으로 사용하기 시작한 축방향 밀링 가공이며, 그 형태는 드릴링 가공과 유사하다. 따라서 플런지/드릴링 가공에서의 칩 두께는 Fig. 2 에서 알 수 있듯이 이송 속도 v_f 및 절삭날 각도 κ 와 밀접한 관계를 갖는데, 특히 주축 회전수가 일정한 경우의 칩 두께 h_m 은 이송 속도 v_f , 공구 날수 z , 주축 회전수 S 및 절삭날 각도 κ 에 대해서 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$h_m = \frac{v_f \cdot \sin \kappa}{z \cdot S} \quad (8)$$

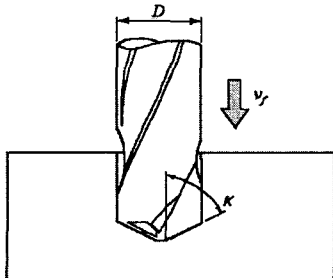


Fig. 2 Plunge/drilling operation

플런지/드릴링 가공에서의 비절삭 저항 k_c 와 절삭 동력 P_c 는 밀링 가공의 경우와 마찬가지로 식 (5)와 (7)을 이용해서 산정할 수 있는데, 밀링 가공과의 차이점은 칩 두께의 관계식들인 식 (4)와 (8)이 서로 다르다는 데 있다.

3. 이송 속도 및 NC 프로그램의 최적화

3.1 공구 및 공작물의 설정

절삭 동력을 해석하기 위해서는 Fig. 3 과 같은 다양한 형태의 공구 정보들이 요구된다. 본 연구에서는 공구 길이, 공구 직경, 공구 날수, 절삭날의 나선 방향, 플루트(flute)의 길이 등과 같은 형상 정보 외에도 공구 제조회사, 공구 형태, 공구 재질 등과 관련된 공구 정보들을 체계적으로 관리하고 검색하기 위해서 Fig. 4 와 같은 관계형 DB 형태로 전용화된 공구 DB 를 구축하였고, 공작물의 형상과 크기, 공칭 비절삭 저항, 가공 지수, 경도 등과 같은 공작물 정보들을 체계적으로 관리하

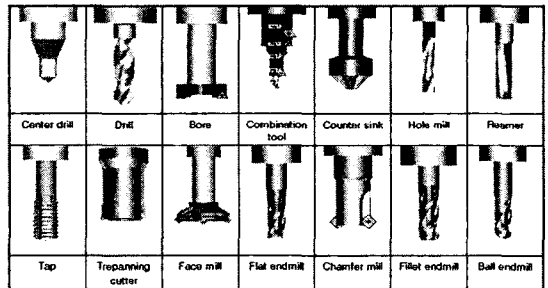


Fig. 3 Milling and drilling tools

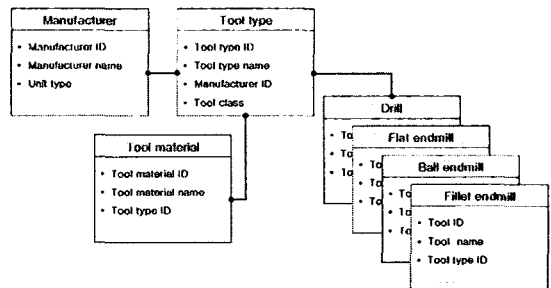


Fig. 4 Scheme of tool database

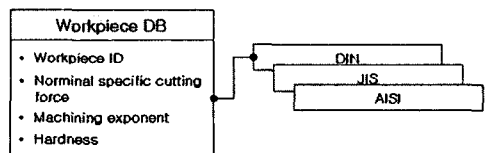


Fig. 5 Scheme of workpiece database

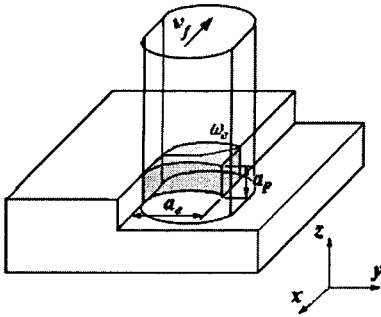


Fig. 6 Cutting parameters and status

고 검색하기 위해서 Fig. 5 와 같은 형태의 공작물 DB 를 구축하였다.

3.2 재료 제거율

밀링 가공을 수행하는 경우에는 일반적으로 공구에 의해서 제거되는 공작물의 절삭 부위나 공구 경로가 일정하지 않기 때문에 절삭 깊이, 절삭 폭, 공구와 공작물 사이의 맞물림 각도 등과 같은 절삭 상황이 시시각각으로 변하게 된다. 따라서 이러한 절삭 상황을 정확하게 산정하기 위해서 Fig. 6 과 같이 공구 경로를 따라서 이송량만큼 공구를 스윕하여 생성한 절삭 공간과 공작물 형상 사이의 불리안 연산(교집합)을 먼저 수행하고, 그 결과로 얻어지는 절삭 부위를 이용해서 절삭 깊이, 절삭 폭, 공구와 공작물 사이의 맞물림 각도 등을 도출하였다. 또한 이러한 개념으로 절삭 상황을 산정하는 경우의 재료 제거율 Q 는 절삭 부위의 체적 V_c (mm³), 이송 속도 v_f , 공구 경로의 길이 d_c (mm)에 의해서 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{V_c \cdot v_f}{d_c} \quad (9)$$

특히 본 연구에서는 재료 제거율 Q 를 도출하는 데 필요한 절삭 부위의 체적 V_c 를 실시간적으로 계산하기 위해서 Z-버퍼(Z-buffer) 알고리즘의 하나인 Goldfeather CSG 렌더링 알고리즘⁽¹¹⁾에 기반을 둔 공구의 스윕 형상과 공작물 형상 사이의 불리안 연산을 수행하였다.

3.3 이송 속도의 최적화

3.3.1 밀링 가공의 최적 이송 속도

본 연구에서의 '절삭 동력을 이용한 이송 속도의 최적화 방법'은 공구의 형상, 공작물의 재질, 공구에 의한 공작물의 절삭 부위 등과 같은 절삭 상황을 토대로 산정한 절삭 동력이 허용 절삭 동력과 일치하도록 이송 속도를 변화시키는 개념에 토대를 두고 있다. 따라서 이송 속도의 최적화 과정에서 절삭 동력 해석 모델에 대한 역 연산과

정이 필요하게 된다.

Fig. 1 과 같은 밀링 가공에서의 절삭 동력 P_c 는 식 (4)의 칩 두께 h_m , 식 (5)의 비절삭 저항 k_c , 식 (9)의 재료 제거율 Q 를 식 (7)에 대입해서 정리하면 아래와 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$P_c = \frac{k_{c1.1} \cdot V_c \cdot v_f^{1-m_c} \cdot (1 - 0.01 \cdot \gamma_0)}{6 \times 10^4 \cdot \eta \cdot d_c \cdot \left(\frac{360 \cdot a_e \cdot \sin \kappa}{\pi \cdot D \cdot \omega_c \cdot z \cdot S} \right)^{m_c}} \quad (10)$$

본 연구에서는 밀링 가공의 절삭 동력이 이송 속도의 함수라는 사실을 의미하는 식 (10)에 주목해서 이송 속도가 절삭 동력의 함수로 표현되도록 식 (10)을 식 (11)과 같이 변환시킨 후, 허용 절삭 동력에 따라서 최적의 이송 속도를 산정하였다.

$$v_f = \left\{ \frac{6 \times 10^4 \cdot P_c \cdot \eta \cdot d_c \cdot \left(\frac{360 \cdot a_e \cdot \sin \kappa}{\pi \cdot D \cdot \omega_c \cdot z \cdot S} \right)^{m_c}}{k_{c1.1} \cdot V_c \cdot (1 - 0.01 \cdot \gamma_0)} \right\}^{\frac{1}{1-m_c}} \quad (11)$$

3.3.2 플런지/드릴링 가공의 최적 이송 속도

밀링 가공의 경우와 마찬가지로 플런지/드릴링 가공의 경우에도 절삭 상황을 고려해서 산정한 절삭 동력이 허용 절삭 동력과 일치하도록 이송 속도를 최적화하기 위해서는 절삭 동력 해석 모델에 대한 역 연산 과정이 필요하다.

Fig. 2 와 같은 플런지/드릴링 가공에서의 절삭 동력 P_c 는 식 (8)의 칩 두께 h_m , 식 (5)의 비절삭 저항 k_c , 식 (9)의 재료 제거율 Q 를 식 (7)에 대입해서 정리하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P_c = \frac{k_{c1.1} \cdot V_c \cdot v_f^{1-m_c} \cdot (1 - 0.01 \cdot \gamma_0)}{6 \times 10^4 \cdot \eta \cdot d_c \cdot \left(\frac{\sin \kappa}{z \cdot S} \right)^{m_c}} \quad (12)$$

플런지/드릴링 가공의 절삭 동력이 이송 속도의 함수라는 사실을 나타내는 식 (12)를 이용해서 이송 속도가 절삭 동력의 함수로 표현되도록 변환시키면, 식 (13)과 같은 형태로 허용 절삭 동력에 따라서 최적의 이송 속도를 산정할 수 있는 관계식을 얻을 수 있다.

$$v_f = \left(\frac{6 \times 10^4 \cdot P_c \cdot \eta \cdot d_c \cdot \left(\frac{\sin \kappa}{z \cdot S} \right)^{m_c}}{k_{c1.1} \cdot V_c \cdot (1 - 0.01 \cdot \gamma_0)} \right)^{\frac{1}{1-m_c}} \quad (13)$$

3.4 NC 프로그램의 최적화

Fig. 7 은 초기 NC 프로그램으로부터 이송 속도를 최적화한 NC 프로그램을 도출하는 일련의 과정을 순서도의 형태로 나타낸 것이다.

먼저 초기 NC 프로그램의 역 후처리(reverse post-processing) 과정을 통해서 NC 프로그램으로부터 공구 경로를 추출한다. 그러나 임의의 형상을 가공하는 경우에는 절삭 깊이, 절삭 폭, 공구와 공작물 사이의 맞물림 각도 등과 같은 절삭 상황이 지속적으로 변하기 때문에 공구 이송량이 길수록 절삭 상황을 제대로 평가하기가 어렵고, 특히 하나의 NC 블록(NC block)에 의해서 주어지는 공구 이송량은 다양하기 때문에 최적화 결과의 정밀도와 신뢰성을 향상시키기 위해서 본 연구에서는 NC 블록에서의 최소 공구 이송량이 공작기계의 가감속 시간의 2 배 수준이 되도록 공구 경로를 보완하여 미소 공구 경로를 산정하고, 그 미소 공구 경로를 토대로 공구의 미소 절삭 공간을 생성하였다.

그리고 미소 절삭 공간과 공작물 형상 사이의 불리안 연산을 토대로 절삭 상황과 관련된 절삭

매개변수들을 산정한 후, 허용 절삭 동력에 대한 이송 속도의 최적화 관계식들인 식 (11)과 (13)을 이용하여 미소 공구 경로에 대한 최적 이송 속도를 결정하였다. 따라서 허용 절삭 동력에 대해서 이송 속도가 최적화된 NC 프로그램은 이러한 미소 공구 경로와 최적 이송 속도로부터 재구성할 수 있으며, 특히 동일한 NC 블록에서 파생된 인접한 두 미소 공구 경로의 최적 이송 속도 차이가 허용 오차 이내인 경우에는 그 미소 공구 경로들을 하나의 공구 경로로 재통합하는 방법으로 최적 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다. Fig. 8 은 이러한 개념을 토대로 도출한 NC 프로그램의 최적화 사례를 보여주고 있다.

4. 적용 사례 및 고찰

본 연구에서 제안한 ‘절삭 동력을 이용한 이송 속도의 최적화 방법’에 대한 효율성을 검토하기 위한 목적으로 Visual C++6.0 과 OpenGL 라이브러리를 이용하여 전용 프로그램을 구현하였다. 그리고 그 적용 대상으로 Fig. 9(a)와 같은 형상의 포켓 가공(10)을 선정하고, ㈜이엔소프트의 CAD/CAM 시

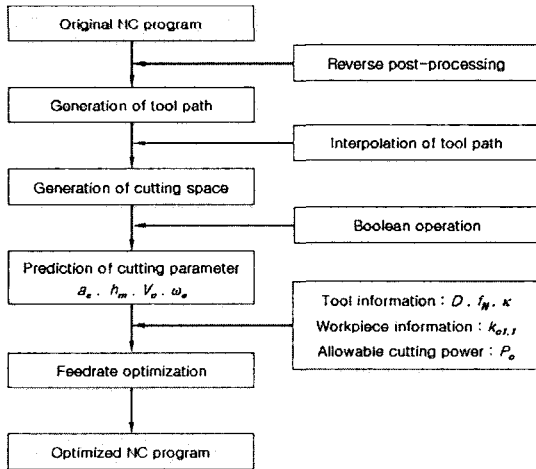


Fig. 7 Optimization process of NC program

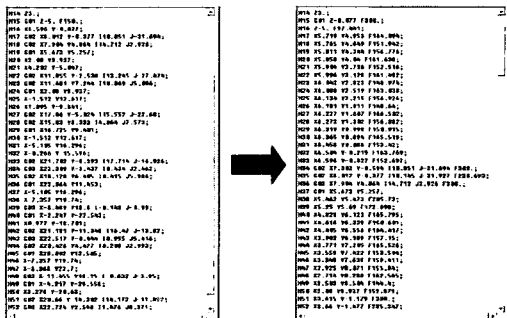
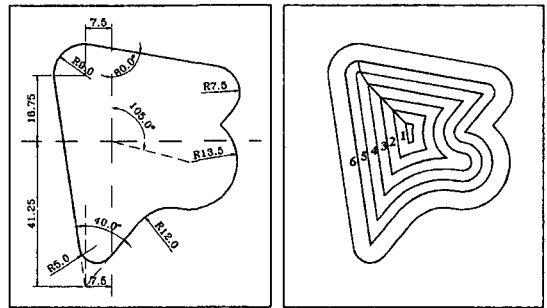


Fig. 8 Optimization of NC program



(a) Pocket shape (b) Tool path

Fig. 9 Test model

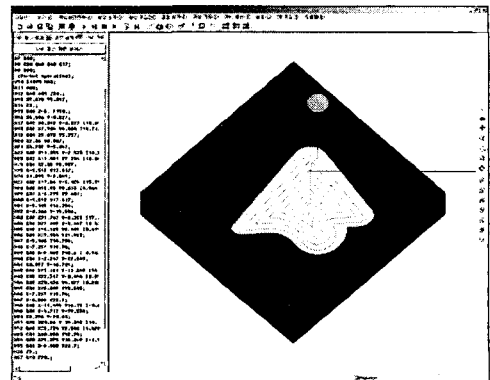


Fig. 10 Virtual machining

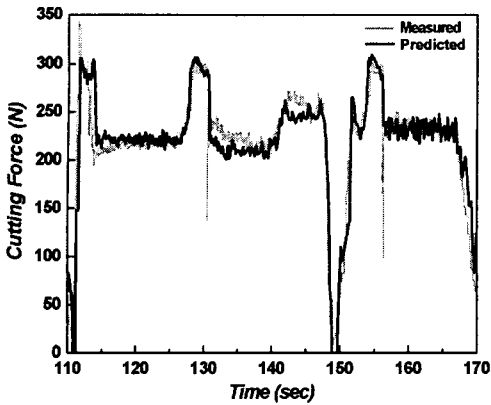


Fig. 11 Comparison of measured and predicted cutting forces for 5th loop of tool path

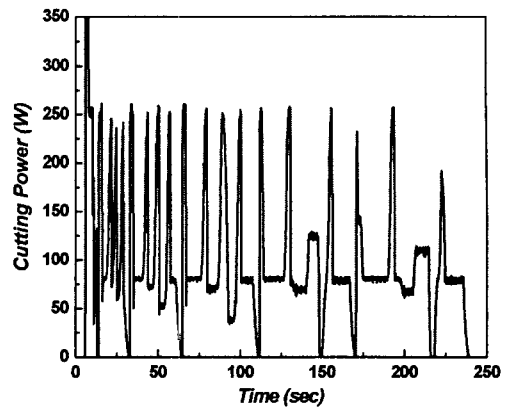


Fig. 13 Cutting power at feedrate 150mm/min

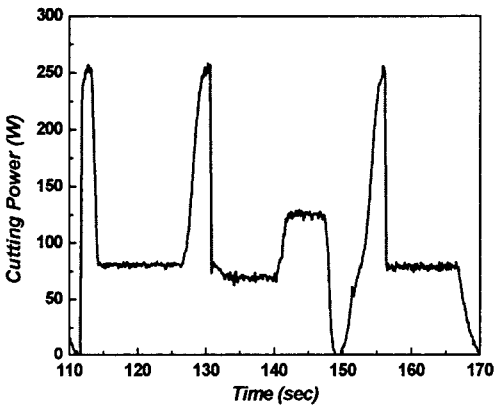


Fig. 12 Cutting power for 5th loop of tool path

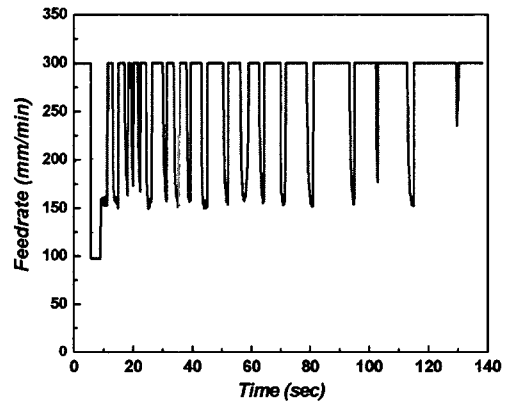


Fig. 14 Optimum feedrate

시스템인 EnS-Mill⁽¹³⁾을 이용해서 Fig. 9(b)와 같은 공구 경로를 생성하였다. 공구 경로의 생성을 위해서 사용한 공구는 직경 10mm, 경사각 11°, 나선각 30°, 날수 4 개인 고속도강 재질의 플랫 엔드밀이고, 재질이 알루미늄 2024-T4 인 공작물을 절삭 깊이가 5mm, 공구 경로 간격 3mm, 절삭 이송 속도 150mm/min, 주축 회전수 1,000rpm 으로 가공하는 경우를 상정하였으며, Fig. 10 은 이러한 조건들을 토대로 가상 가공한 결과를 보여주고 있다.

또한 비절삭 저항 관계식인 식 (5)에서의 가공 지수 m_c 와 공칭 비절삭 저항 $k_{c1.1}$ 은 공작물 재질이 알루미늄 2024-T4 인 경우에 각각 700 N/mm²과 0.32 로 주어진다. Fig. 11 은 Fig. 9(b)에 제시한 공구 경로의 5 번 루프에 대한 절삭력의 측정값⁽¹⁰⁾과 식 (6)에 기반을 둔 예측값을 비교해서 보여주고 있는데, 측정값과 예측값이 잘 일치한다는 사실로부터 본 연구에서 비절삭 저항 관계식을 토대로 구축한 절삭력 및 절삭 동력의 예측 모델은 신뢰도가 높음을 확인할 수 있다.

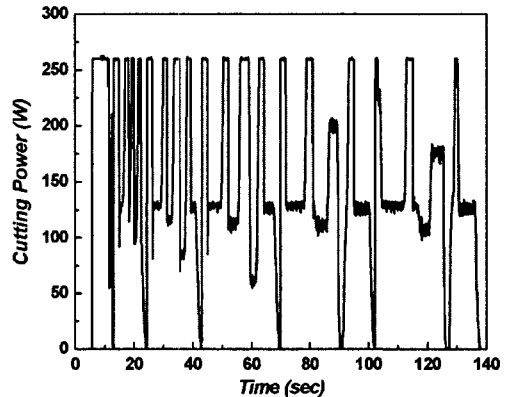


Fig. 15 Cutting power at optimum feedrate

Fig. 12 는 공구 경로의 5 번 루프에 대한 절삭 동력의 예측값을 보여주고 있다. 전체적으로 절삭력과 절삭 동력의 증감 형태는 유사하지만, 절삭력이 큰 부분에서는 절삭력의 증가율보다 절삭 동력의 증가율이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 이러한 부분은 절삭에 참여하는 공구 날수가 2 개이

거나 맞물림 각도가 상대적으로 큰 경우로 확인되었다. 또한 전구간에 대한 절삭 동력의 변화는 Fig. 13 에 제시하였다. 이 경우의 실절삭 시간은 233.7sec 이며, 최대 절삭 동력은 348.7W 로 포켓 가공을 위한 수직 진입 구간에서 발생하였다. 그러나 포켓 가공으로의 수직 진입 구간을 제외한 1 번 루프의 시작점부터 6 번 루프의 종료점까지의 공구 경로에 대한 최대 절삭 동력은 260.8W 로 예측되었다.

따라서 본 연구에서는 260.8W 를 허용 절삭 동력으로 하고, 절삭 이송 속도의 하한과 상한을 기존 절삭 이송 속도 150mm/min 의 50%와 200%인 75mm/min 과 300mm/min 으로 하는 절삭 이송 속도의 최적화를 수행하였다. 특히 주축 회전수가 1,000rpm 이고, 공작기계의 가감속 시간을 60msec 로 가정한 관계로 가감속 시간의 2 배인 120msec 에 대응하는 공구 2 회전당의 이송량을 NC 블록에서의 최소 공구 이송량으로 설정하였으며, 그 최소 공구 이송량을 기준으로 공구 경로를 보간하여 미소 공구 경로를 산정하였다. 그리고 동일한 NC 블록에서 파생된 인접한 두 미소 공구 경로의 최적 이송 속도 차이가 절삭 이송 속도의 상한 300mm/min 의 1%인 3mm/min 이내인 경우에는 그 미소 공구 경로들을 하나의 공구 경로로 재통합하여 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다. 이러한 개념 하에서 63 개의 NC 블록들로 구성된 초기 NC 프로그램은 1,980 개의 미소 NC 블록들로 분할된 후, 최종적으로 310 개의 NC 블록들로 재통합된 최적 NC 프로그램으로 변환되었으며, 최적화 과정의 소요 시간은 2.6GHz 의 CPU 가 탑재된 Intel Pentium-IV 에서 4.921sec 로서 매우 짧게 나타났다.

Fig. 14 와 15 는 이러한 조건들을 이용해서 최적화한 절삭 이송 속도와 그에 대응하는 절삭 동력을 보여주고 있다. 절삭 이송 속도는 포켓 가공으로의 수직 진입 구간을 제외한 구간에서는 모두 150mm/min 이상인 것으로 나타났다. 그리고 절삭 이송 속도의 최적화에 의해서 최대 절삭 동력은 348.7W 에서 262.5W 로 낮아지고, 평균 절삭 동력과 평균 절삭 이송 속도는 102.3W 와 150mm/min 에서 144.3W 와 279.6mm/min 으로 향상되기 때문에 과부하 방지 및 고능률 가공이 함께 도모되고 있음을 알 수 있다. 특히 최적 절삭 이송 속도에 의한 실절삭 시간은 132.4sec 로 나타났는데, 절삭 이송 속도 150mm/min 에서의 실절삭 시간인 233.7 sec 와 비교할 때 실절삭 시간이 56.7% 수준으로 크게 감소하였다는 사실은 본 연구에서 제안한

Table 1 Sensitivities for various factors

Factor	Real cutting time (sec)	Average cutting power (W)	Average cutting feedrate (mm/min)
Allowable cutting power (W)	-0.199 (-0.392)	0.170 (0.306)	0.176 (0.163)
Upper limit of cutting feedrate (mm/min)	-0.325 (-0.739)	0.227 (0.473)	0.828 (0.889)
Spindle speed (rpm)	0.016 (0.124)	0.032 (0.222)	-0.015 (-0.053)

‘절삭 동력을 이용한 이송 속도의 최적화 방법’이 고능률 가공에 의한 생산성 향상에 크게 기여할 수 있다는 것을 의미한다.

절삭 이송 속도의 최적화와 관련된 주요 인자로는 허용 절삭 동력, 절삭 이송 속도의 상한, 그리고 주축 회전수 등이 있다. Table 1 은 이러한 인자들에 의한 실절삭 시간, 평균 절삭 동력, 평균 절삭 이송 속도의 민감도 해석 결과를 보여주고 있다. 해석 결과로부터 허용 절삭 동력이 1W 증가하면, 실절삭 시간은 0.199sec 감소하고, 평균 절삭 동력은 0.170W 증가하며, 평균 절삭 이송 속도는 0.176mm/min 이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 절삭 이송 속도의 상한이 1mm/min 증가하면, 실절삭 시간은 0.325sec 감소하고, 평균 절삭 동력은 0.227W 증가하며, 평균 절삭 이송 속도는 0.828 mm/min 이 증가하게 된다. 그리고 주축 회전수가 1rpm 증가하면, 실절삭 시간은 0.016sec 증가하고, 평균 절삭 동력은 0.032W 증가하며, 평균 절삭 이송 속도는 0.015mm/min 이 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이와 같이 다른 인자들에 의한 민감도를 서로 비교하기 위해서 허용 절삭 동력은 260.8W, 주축 회전수는 1,000rpm, 절삭 이송 속도의 상한은 300mm/min, 실절삭 시간은 132.4sec, 평균 절삭 동력은 144.3W, 평균 절삭 이송 속도는 279.6mm/min 를 기준으로 하는 백분율(%) 형태로 변환하여 무차원화한 값을 Table 1 의 () 안에 제시하였다. 무차원 민감도 해석 결과로부터 실절삭 시간, 평균 절삭 동력, 평균 절삭 이송 속도에 미치는 영향은 절삭 이송 속도의 상한, 허용 절삭 동력, 주축 회전수의 순으로 크다는 것을 확인하였다. 특히 절삭 이송 속도의 상한이 1% 증가하면, 실절삭 시간은 0.739% 감소하고, 평균 절삭 동력은 0.473% 증가하며, 평균 절삭 이송 속도는 0.889%가 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 공구 형상, 공작물 재질, 절삭 부위 등과 같은 절삭 상황을 토대로 산정한 절삭 동력이 허용 절삭 동력과 일치하도록 이송 속도를 변화시키는 ‘절삭 동력을 이용한 이송 속도의 최적화 방법’을 제안하고, 고능률 가공으로의 적용성을 검토하였다. 그리고 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구의 이송 속도 최적화 방법은 절삭 동력의 관점에서 이송 속도를 최적화하기 때문에 밀링 가공과 플런지/드릴링 가공 모두에 대해서 일관성을 가지고 통합적으로 적용할 수 있다.

(2) 이송 속도의 최적화 결과에 대한 정밀도와 신뢰성을 향상시키기 위해서 NC 블록에서의 최소 공구 이송량이 공작기계의 가감속 시간의 2 배 수준이 되도록 미소 공구 경로를 보간 산정하고, 그 미소 공구 경로를 토대로 공구의 미소 절삭 공간을 생성하였다.

(3) 미소 절삭 공간과 공작물 형상 사이의 불리안 연산을 통해서 절삭 매개변수들을 산정한 후, 허용 절삭 동력에 대한 미소 공구 경로의 최적 이송 속도를 결정하였다. 특히 불리안 연산의 고속화는 Goldfeather CSG 렌더링 알고리즘을 토대로 구현하였다.

(4) 미소 공구 경로와 최적 이송 속도를 이용해서 NC 프로그램을 재구성하였다. 그리고 인접한 두 미소 공구 경로가 동일한 직선이나 원호 상에 위치하면서 이송 속도가 허용 오차 이내에 있는 경우에는 그 경로들을 통합함으로써 NC 프로그램의 크기를 최소화하였다.

(5) 본 연구의 이송 속도 최적화 방법은 최적화 과정의 소요 시간이 매우 짧고, 과부하 방지 및 고능률 가공에 매우 효과적임을 모의 가공을 통해서 입증하였다. 특히 초기 NC 프로그램의 밀링 공정에 대한 최대 절삭 동력을 허용 절삭 동력으로 하는 최적화 사례는 실질적 시간을 56.7% 수준으로 대폭 감소시키는 것으로 나타나 생산성 향상에 크게 기여함을 보여주었다.

후기

본 연구는 한국항공대학교의 2003년도 교비 연구과제의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Ko, J. H., Yun, W. S. and Cho, D. W., 2003, "Off-Line Feed Rate Scheduling Using Virtual CNC Based on an Evaluation of Cutting Performance," *Computer Aided Design*, No. 35, pp. 383~393.
- (2) http://www.agiletec.co.kr/product/tool2k_opt.php
- (3) Wang, K. K., 1988, "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three Dimensional NC End Milling," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 57~65.
- (4) <http://www.mastercam.com/camzone/Newsletters/4-98.html>
- (5) http://www.cgtech.com/optimize_frame.htm
- (6) <http://cscam.co.kr/product3.html>
- (7) Bae, S. H., Ko, K. H., Kim, B. H. and Choi, B. K., 2003, "Automatic Feedrate Adjustment for Pocket Machining," *Computer Aided Design*, No. 35, pp. 495 ~ 500.
- (8) Park, H. D. and Yang, M. Y., 1989, "A Study on the Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling Process," *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 13, No. 3, pp. 433~442.
- (9) Lee, W. J., Yun, T. S. and Kim, S. I., 1999, "Development of a Machining Error Estimation System for Vertical Lathes with Structural Deformation and Geometric Errors," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 3, pp. 15~22.
- (10) Lee, H. U. and Cho, D. W., 2003, "Accurate Milling Process Simulation Using ME Z-Map Model," *Proc. of 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress*, Washington, D.C., November, pp. 15~21.
- (11) Goldfeather, J., Molnar, S., Turk, G. and Fuchs, H., 1989, "Near Real-Time CSG Rendering Using Tree Normalization and Geometric Pruning," *IEEE CG&A*, Vol. 9, No. 3, pp. 20~28.
- (12) Seco Tools AB, "Technical Data," *Seco-Carboly Catalog*.
- (13) http://ensoft21.co.kr/sub3_2.htm