한국공작기계학회 2002 추계학술대회 논문집 pp. 135~140

절삭력 최적화를 위한 이송속도 제어 시스템에 관한 연구

김성진 (통일중공업), 정영훈 (포항공대 기계공학과), 조동우 (포항공대 기계공학과)

A Study on Feedrate Optimization System for Cutting Force Optimization

Seongene Kim (Tong-il Heavy Industry), Yeong-Hoon Jeong (Graduate School, POSTECH),
Dong-Woo Cho (Dept. of Mech. Eng., POSTECH)

Abstract

Studies on the optimization of machining process can be divided into two different approaches: off-line feedrate scheduling and adaptive control. Each approach possesses its respective strong and weak points compared to each other. That is, each system can be complementary to the other. In this regard, a combined system, which is a feedrate control system for cutting force optimization, was proposed in this paper to make the best of each approach. Experimental results show that the proposed system could overcome the weak points of two systems.

1. 서 론

1950년대에 수치제어(numerical control)가 공작 기계에 도입된 이후 공작기계는 가공성능의 비약적 발전을 통하여 가공시간 단축 및 가공품질 향상을 꾀하고 있다. 그러나, 밀링공정은 복잡하고 비선형적인 특성으로 인해 정확하게 해석하기 힘들고, 공작기계는 실제 절삭공정에서 일어날 수 있는 임의의 상황에 대한 대처능력을 가지고 있지 않기 때문에 절삭공정의 자동화를 위해 많은 연구가 이루어져 오고있다.

절삭공정의 중요한 지표인 절삭력을 효과적으로 제어하기 위한 연구는 크게 다음과 같은 두 가지 형태로 이루어져 오고 있다.

① 절삭공정 모델링을 통한 절삭력 제어 (off-line feedrate scheduling)
② 실시간 측정을 통한 절삭력 적응제어 (adaptive control)

위의 두 방법은 서로 상반된 장단점을 가지고 있다. ①의 방법은 앞으로 일어날 절삭상태를 절삭공정 모델링을 통해 예측이 가능하지만, 실제 가공에서의 모델링 되지 못한 상황에 대한 대처가 불가능하다. 그러나 ②의 방법은 절삭공정에 대한 예측이 어렵지만, 실제 가공시 발생할 수 있는 돌발상황에 대한 대처가 뛰어나다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 오프라인 이송속도 스케줄링과 적응제어 기법을 통합하여 각 방법의 장점을 이용함으로써 절삭력을 효과적으로 추종 시킬 수 있는 이송속도 최적화 시스템을 제안하고, 그 성능을 검증하였다. 또한 최근에 활발히 연구되고 있는 이송속도 스케줄링 기법이 적응제어기를 장착한 공작기계에서 제 기능을 발휘하며, 나아가 가공품질의 향상을 기대할 수 있음을 보이고자 하였다.

2. 이송속도 최적화 시스템

2.1 오프라인 이송속도 스케줄링

오프라인 이송속도 스케줄링은 절삭력 예측이 가능한 절삭공정 모델을 이용하여 주어진 가공 명령(NC 코드)의 이송속도를 절삭력이 일정하게 유지될 수 있도록 재설정한, 수정된 NC 코드를 사용하여 가공품질을 향상시키려는 방법이다.

절삭력 예측에 관한 지금까지의 연구는 주로 단일 공구 경로에 대해서만 적용할 수 있었고, 절삭 조건이 변화하면 절삭계수를 다시 결정해야 하는 것이 일반적이었다[1,2]. 또한 VERICUT[3]과 같은 소프트웨어의 경우 금속 제거율을 일정하게 유지하여 가공성과 안정성의 기준이 되는 절삭력을 정확하게 고려하지 못하는 문제를 안고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 연구에 비해 절삭력 예측이 뛰어나며 일반적인 절삭공정에 적용할 수 있는 가상가공 시스템을 선택하였다[4,5,6]. Fig. 2는 채택된 시스템이 예측한 절삭력과

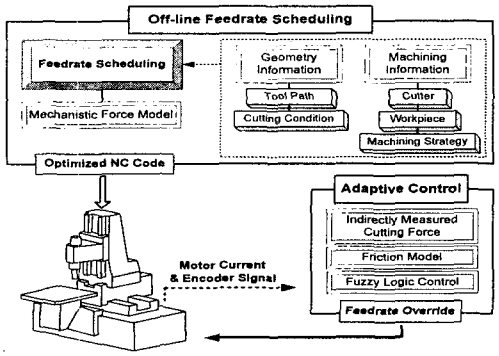


Fig. 1 Schematic diagram of the feedrate optimization system for the cutting force regulation.

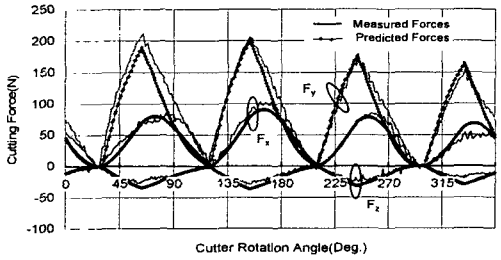


Fig. 2 Comparison between the measured and predicted cutting forces.

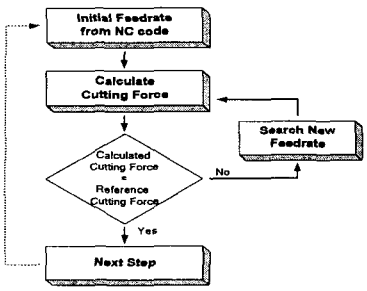


Fig. 3 Schematic flow chart of the off-line feedrate scheduling.

측정한 절삭력을 비교한 것이다[4].

채택된 가상 가공 시스템을 통하여 이송 속도가 재조정 되는 과정은 Fig. 3과 같다. 처음 주어진 이송속도를 바탕으로 절삭력을 산출하여 기준 절삭력과 비교하고, 만족하지 않을 경우에는 새로운 이송속도를 찾는다[6].

2.2 적응제어

절삭력 적응제어는 절삭력을 측정 또는 추정하여 절삭력이 일정한 수준으로 유지되도록 가공조건을 실시간으로 제어하는 것이다.

공구동력계와 가속도계 등이 절삭력 획득을 위하여 주로 사용되어왔으나, 최근에는 전류센서를 이용한 모터 전류 측정을 통한 절삭력 획득이 실용성 높은 방법으로서 주목 받고 있다. 이는 구성이 단순하고 가격이 저렴할 뿐만 아니라, 가공조건 및 공작물에도 영향을 받지 않아 현장 적용 가능성이 높기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 이송계 모터 전류변화 측정을 통한 절삭력 획득 장치를 구성하였다.

본 연구에서 구성한 적응제어 방법은 복잡한 절삭공정과 이송계의 모델링 없이, 경험에 의해 얻어진 언어적인 규칙을 사용하여 성공적인 결과를 얻을 수 있는 퍼지제어[7,8]를 이용하였다.

2.2.1 모터 전류와 구동 토크

가공중의 절삭력은 이송계 모터에 외란토크의 형태로 작용하여, 이송계 모터 전류 변화량으로 나타난다. 따라서, 절삭력과 구동모터 전류 사이의 관계는 모터의 전류와 구동토크의 관계, 그리고 이 구동토크와 절삭력 관계에 의하여 결정된다[9].

영구자석 동기모터(permanent magnet synchronous motor, PMSM)의 경우 위상차 120°를 갖는 3상 전류가 인가된다. 식 (1), (2)를 이용하여 3상 전류로부터 모터 구동 토크를 계산할 수 있다.

$$T_m = K_t I_q \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(n_p\theta)\ \cos(n_p\theta+\frac{2\pi}{3})\ \cos(n_p\theta-\frac{2\pi}{3}) \\ \sin(n_p\theta)\ \sin(n_p\theta+\frac{2\pi}{3})\ \sin(n_p\theta-\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 K_t는 토크상수, θ는 회전자상의 d-q 좌표계에서 q축의 u축 권선에 대한 상대 각위치, n_p는 영구자석 회전자의 극 수이다. I_d, I_q는 직류성분으로 변환된 전류의 순시치이며 일반적인 작동영역에서 I_d = 0으로 유지되며, 구동토크는 I_q에 비례한다.

이송 테이블과 볼스크류의 쿨롱 마찰과 점성감쇠 등을 고려하고 이송계의 관성효과를 고려하면, 식 (3)과 같이 절삭력과 모터 구동토크의 관계를 나타낼 수 있다[10].

$$T_m = J_e \frac{d\omega}{dt} + T_f + T_d \tag{3}$$

T_m : 테이블 구동토크 (N·m)

T_d : 외란토크 (N·m)

T_f : 마찰력 (N·m)

J_e : 등가 관성량 (N·m·sec^2/rad)

2.2.2 이송계 마찰의 영향

이송계의 마찰이 모터 전류에 미치는 영향을 파악하기 위하여 x, y축에 대하여 이송 방향과 속도를 변화시키면서 모터 전류를 측정 하였다

이송모터 전류는 홀 센서(hall sensor)를 이용하여 획득한 후 A/D 보드로 측정하였다. 측정 주파수 는 1 kHz이고, 200 Hz로 저주파 통과 필터링(low pass filtering) 하였다.

Fig. 4에서와 같이 이송모터 전류는 이송속도와 이송방향에 따라 다른 값을 나타내었다. 특히 이송속도 200 mm/min를 기준으로 이보다 낮은 속도에서는 회전속도가 감소함에 따라 모터 전류가 급격히 증가하는 형태를 보였다.

따라서 Fig. 4와 유사한 형태를 갖는 지수 함수와 1차 함수의 합($Y = P_1 e^{-x/P_2} + P_3 + P_4 x$)의 형태를 갖는 함수로 모델링하여 다음과 같은 결과를 얻었으며, Fig. 5에 +x축 방향의 fitting 결과를 나타내었다.

$$\text{+x dir.} : I_q = 0.09269e^{-x/87.96106} + 0.49849 + 0.00008x \quad (4)$$

$$\text{-x dir.} : I_q = 0.26026e^{-x/67.55754} + 0.49609 + 0.00005x \quad (5)$$

$$\text{+y dir.} : I_q = 0.13084e^{-x/63.97026} + 0.47849 + 0.00009x \quad (6)$$

$$\text{-y dir.} : I_q = 0.12606e^{-x/65.35602} + 0.42415 + 0.00009x \quad (7)$$

2.2.3 이송계 관성의 영향

Fig. 6은 x축 이송계를 0 mm/min에서 1500 mm/min으로, 가감속 시간 20 msec로 가속시켰을 때 모터의 구동토크 및 그 때의 가속도를 나타낸 것이다. 1 m/sec^{2}의 가속력을 위해서는 약 0.78 A의 전류가 필요한 것을 알 수 있었다. 하지만 이는 반경이 10 mm인 원을 이송속도 60000 mm/min으로 움직이는 경우에 해당하는 가속력이다. 보통의 가공이 600 mm/min 이하의 영역에서 이루어지는 것을 고려할 때 관성에 의한 구동토크는 0.008 A 정도에 해당하고, 이것은 마찰력과 견주어 무시할 만 한 수준임을 알 수 있었다.

2.2.4 절삭력과 모터 전류의 관계

본 연구에 사용된 절삭력 간접 측정 시스템의 대역폭을 알아보았다. 100 Hz 미만의 이물림 주파수에 해당하는 신호가 전류에 잘 반영되고 있어, 간접 측정 시스템을 적용할 수 있었다.

그러나 100 Hz의 이물림 주파수에 대해서는 전류에 이물림 주파수에 해당하는 주파수 신호가 잘 반영되지 않기 때문에 간접 측정 시스템으로 활용할 수 없었다. 전류 센서(LA 55-P, LEM)의 대역폭이 200 kHz 이상임을 고려할 때[11], 본 실험에 사용된 시대중공업의 탭밀센터 SPT-V30T의 이송계와 LG 서보모터의 응답특성이 100 Hz 미만인 것으로 생각되며, 절삭력 간접 측정 시스템은 100 Hz 미만의 이물림 주파수를 갖는 절삭력에 대해서만 적용될 수 있었다.

이물림 주파수에 따른 전류 대 절삭력 비를 측정하기 위하여 이물림 주파수를 일정하게 증가

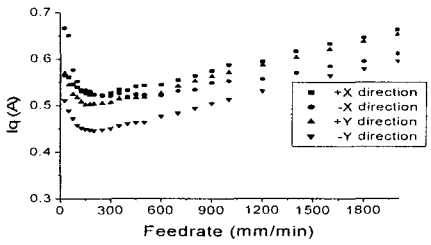


Fig. 4 Relationship between feedrate and motor current

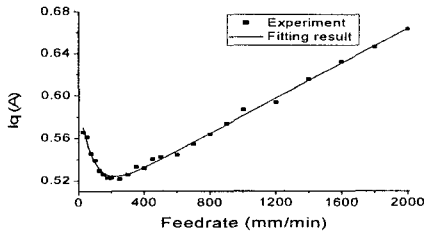
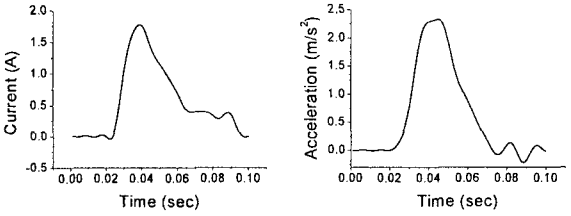


Fig. 5 Relationship between feedrate and motor current in +x direction.



(a) Current (≒ Torque) (b) Acceleration

Fig. 6 Experimental results for inertia effect.

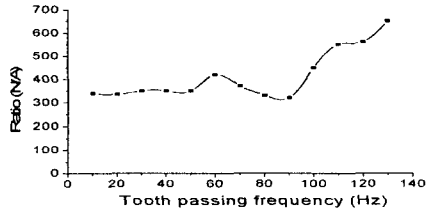


Fig. 7 Relationship between the current and the cutting force in the frequency domain, when moving along x-axis.

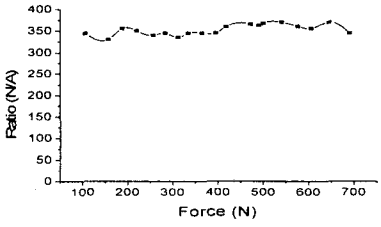


Fig. 8 Relationship between the current and the cutting force, when moving along y-axis.

시켜가며 전류 대 절삭력 비를 측정하였다. Fig. 7은 이송 방향인 x축 모터로부터 얻은 절삭력 성분의 전류를 힘으로 변환하기 위한 전류 대 절삭력 비를 이물림 주파수 별로 나타낸 것이다. 이송방향인 x축 및 정지중인 y축 모터 모두에서 이물림 주파수에 따라서 전류 대 절삭력 비가 일정하지 않음을 알 수 있었다. 즉 이물림 주파수가 달라지면 같은 크기의 절삭력이라 해도 전류는 다름을 알 수 있었다.

일정한 이물림 주파수에 대하여서 절삭력을 증가시켜가며 절삭력과 모터 전류의 관계를 알아보았다. Fig. 8로부터 그 비가 비교적 일정한 것을 알 수 있다. 즉 절삭력이 모터 전류에 선형적으로 잘 반영됨을 보여 준다. Fig. 9은 공구 동력계를 통하여 측정된 절삭력과 모터 전류를 이용하여 얻어낸 간접 절삭력을 보여주고 있다.

2.2.5 퍼지(Fuzzy)를 이용한 적응제어

엔드밀링 공정은 절삭공정의 역학과 공작기계의 구조, 이송계의 동특성이 서로 복잡하게 연관되어 비선형성을 띄므로 정확한 가공 상태를 모델링 하기는 힘들다. 퍼지제어의 경우 절삭공정의 분석과 서보계의 모델링 없이 경험에 의해 얻어진 몇 개의 언어적인 규칙을 사용하여 성공적인 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다[12]. 하지만 다양한 절삭 조건에 대해서 퍼지제어기의 입력 값과 출력 값에 대한 스케일링 인수들을 다시 결정해 주어야 하는 불편함이 있다. 이 문제를 극복하기 위하여 퍼지제어기의 스케일링 인수의 실시간 변경을 적용하였다[13].

식 (8)은 절삭력 오차가 70 N 이하일 때는 더 넓은 수렴조건을 주어 기준 절삭력 근처에서 불안정해지는 것을 방지한다. 식 (9)는 절삭력 오차의 크기에 따라서 적분 제어기의 이득 값과 같은 의미인 GU를 변화시켜 주고, 같은 절삭력 오차라 할지라도 전 샘플링 시간에서의 속도명령 값이 크면 더 큰 인수로 조정하여 빠른 응답을 기대하는 것이다. 그리고 절삭력 오차가 음수인 과부하 상태는 양의 절삭력 오차를 가지는 경우에 비해 더 위험하므로 더 큰 계수를 가지고 있다

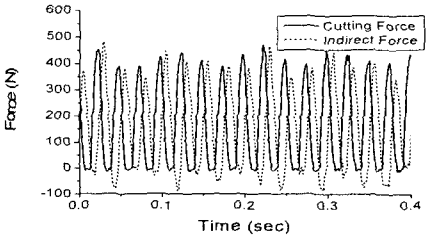
$$GE = \begin{cases} \pm 100N \text{ saturated} & \text{if } |e(nT)| > 70\text{N} \\ \pm 200N \text{ saturated} & \text{if } |e(nT)| \le 70\text{N} \end{cases} \quad (8)$$

$$GU = \begin{cases} (0.00065 * e(nT) + 0.014) * V_{com}((n-1)T) \\ (-0.0009 * e(nT) + 0.020) * V_{com}((n-1)T) \end{cases} \quad (9)$$

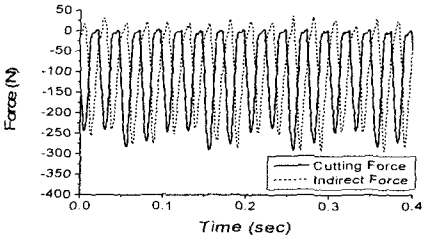
if $e(nT) \ge 0$: Under Loading

if $e(nT) < 0$: Over Loading

$e(nT)$: Cutting force error at n-th sampling time



(a) Feed direction : x-axis



(b) Cross feed direction : y-axis

Fig. 9 Comparison between estimated cutting force and measured cutting force at 40 Hz of the tooth passing frequency.

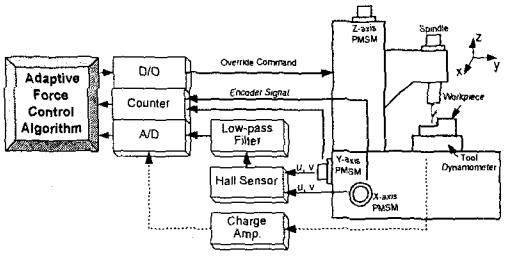


Fig. 10 Schematic diagram of the adaptive control system.

Table 1 Cutting conditions for comparison with the off-line feedrate scheduling.

Reference force	Resultant force 450, 350 N
Spindle RPM	600 rpm
Cutter	ϕ 20, HSS 4-teeth end mill
Workpiece	Al-2024T6
Axial depth of cut	6 mm
Sampling freq.	1000 Hz
Control freq.	10 Hz

3. 실험 및 결과

3.1 하드웨어 구성

오프라인 이송속도 스케줄링의 결과인 수정된 NC 코드를 적용하기 위하여 현대중공업 탭밀 센터 SPT-30T를 개조하여 테스트 베드를 구성하였다. 룩 어헤드(look ahead) 기능을 탑재한 터보 태크 HX CNC 제어기를 사용하였으며, 야스카와

CIMR-25P5 스핀들을 사용하였다. 이송계 구동 유닛으로는 LG 서보 모터 및 서보 드라이브를 사용하였다.

적응제어를 위한 절삭력 간접 측정장치와 그것의 검증을 위한 절삭력 측정장치를 Fig. 10의 개념도와 같이 구성하였다. 카운터 보드를 이용하여 모터의 엔코더 신호로부터 공구의 위치 및 이송속도를 구하였고, 공구동력계를 설치하여 실제 절삭력을 측정하였다.

3.2 오프라인 이송속도 스케줄링 시스템과의 비교평가

오프라인 이송속도 스케줄링은 주어진 절삭물의 기하학적 정보와 절삭공정 모델을 토대로 절삭력을 산출하고, 이송속도를 재조정하기 때문에 실제 가공에서의 예기치 못한 상황은 예측할 수 없다. 하지만 본 연구에서 제시한 이송속도 최적화 시스템은 적응제어를 포함하여 적절한 대응이 가능하므로 오프라인 이송속도 스케줄링 시스템이 해결할 수 없는 과도 절삭을 예방할 수 있다.

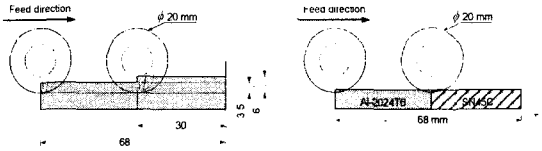
공작물에 대한 기하학적 정보에 오류가 있는 경우와 가공 재료가 불균일할 경우에 대하여 두 시스템의 성능을 비교하여 보았다. 실험을 위하여 잘못된 가공물의 기하학적 정보와 재질 정보, 즉 단이 없는 가공물과 균일한 재질의 가공물을 스케줄링 시스템으로 이송속도를 재조정한 후 실험하였다. 실험 조건은 Table 1과 같으며, 각각의 경우에 있어서 시편의 모양은 Fig. 11의 (a), (b)와 같고 기준 절삭력은 각각 450 N, 350 N이다.

Figs. 12, 13의 실험 결과를 보면 오프라인 이송속도 스케줄링에서 예측할 수 없었던 공작물의 기하학적 오류 및 가공 중의 이상 상태에 대하여 이송속도 최적화 시스템은 ±100 N 이하의 오차를 보이며 반응하는 것을 알 수 있었다.

3.3 적응제어 시스템과의 비교평가

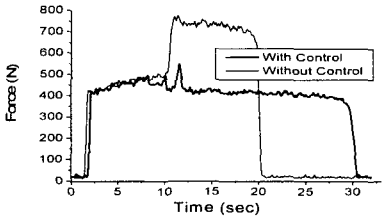
적응제어 시스템은 진행중인 절삭공정에 대한 정보를 수집한 후, 그것을 바탕으로 미리 정해진 규칙에 따라 제어하므로, 앞으로 일어날 절삭 공정에 대한 예측이 불가능하다. 그리고 사용자로부터 주어진 기준 입력과 간접 측정된 값과의 오차에 따라 시스템이 반응하기 때문에 어느 정도의 오차를 가질 수 있다. 따라서 절삭력이 변화하는 구간에서는 적응제어기의 성능에 따라 오버슛(overshoot)이 생길 가능성이 있다. 반면, 본 연구에서 제시한 이송속도 최적화 시스템은 공작물의 기하학적 정보를 가지고 있으므로 절삭력의 변화를 예측할 수 있다.

Fig. 14는 반경방향 깊이가 변화하는 공작물에 대하여 실험한 결과이며, 적응제어 시스템과

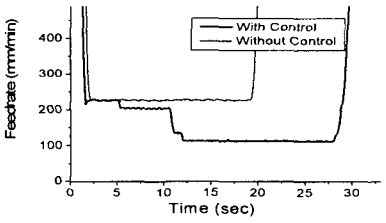


(a) Geometry error (b) Hard spot in workpiece

Fig. 11 Workpiece geometries for comparison between the feedrate optimization system and the off-line feedrate scheduling.

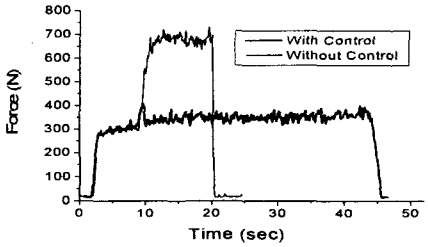


(a) Cutting forces

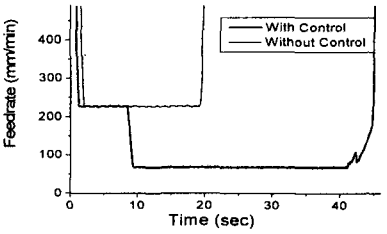


(b) Feedrates

Fig. 12 Comparison between the off-line feedrate scheduling and the feedrate optimization system when there is unexpected geometry error.

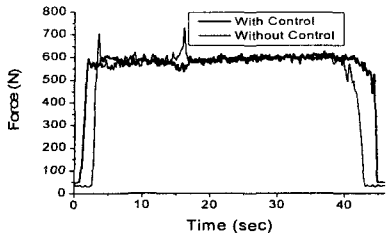


(a) Cutting forces

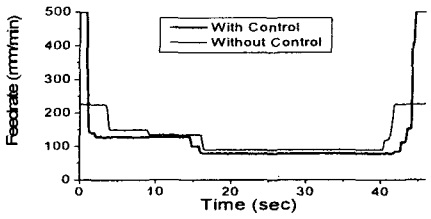


(b) Feedrates

Fig. 13 Comparison between the off-line feedrate scheduling and the feedrate optimization system when there is unexpected hard spot in work-piece.



(a) Cutting forces



(b) Feedrates

Fig. 14 Comparison between the adaptive control and the feedrate optimization system.

이송속도 최적화 시스템의 성능을 비교한 것이다. 실험 조건은 Table 1과 동일하며 축 방향 깊이가 10 mm 이며 기준 절삭력은 600 N이다. 시편의 모양 은 Fig. 11의 (a)와 동일하다.

적응제어에서는 예측할 수 없었던 절삭력 변화를 이송속도 최적화 시스템은 예측할 수 있으므로, 적응제어에서 일어날 수 있는 오버슛이 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

서로 독립적으로 연구되어 오던 오프라인 이송속도 스케줄링과 실시간 적응제어를 엔드밀 공정에 대하여 동시에 적용하여 각 시스템의 장점을 활용하여 효과적으로 절삭력이 원하는 수치에 추종하게 할 수 있음을 보였다.

연구 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 오프라인 이송속도 스케줄링 시스템과 적응제어 시스템을 결합하여 이송속도 최적화 시스템을 제시하고 구성 하였다

2. 본 연구에서 제시한 이송속도 최적화 시스템과 오프라인 이송속도 스케줄링 시스템 및 적응제어 시스템과 비교 실험하였다. 오프라인 이송속도 스케줄링이 예측할 수 없는 공작물의 형상 오류 및 불균일 재료에 대해서도 ±100 N 이하의 오차를 가지며 제어되는 것을 확인 하였다. 그리고, 오버슛이 발생할 가능성이 있는 구간에서도 절삭력이 효과적으로 추종 하는 것을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구과제 (1999-2-31500-002-3)의 연구비 지원에 의한 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Kline, W.A., DeVor, R. E., and Lindberg, R., "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, No. 1, pp. 7-21, 1982.

(2) Altintas, Y., and Spence, A. D., "End Milling Force Algorithms for CAD Systems," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 31-34, 1991.

(3) http://www.cgtech.com/

(4) Yun, W. S. and Cho, D. W., "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting Condition Independent Coefficients in End Milling" , Int. J. of Machine Tools and manufacture, Vol.41, Issue 4, pp.463-478, 2001

(5) 윤원수, 고정훈, 조동우, "가상공작기계의 연구개발 Part I, Part II", 한국정밀공학회지 제18권 제11호, pp. 74-85, 2001.

(6) 이한울, 고정훈, 조동우, "향상된 절삭력 모델 기반의 NC 코드 최적화", 한국정밀공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp. 37-42, 2001

(7) Tarng, Y. S. and Cheng, S. T., "Fuzzy Control of Feed Rate in End Milling Operations," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 33, No. 4, pp. 643-650, 1993.

(8) Hsu, P. L. and Fann, W. R., "Fuzzy Adaptive Control of Machining Processes with a Self-Learning Algorithm," Trans. of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, Nov., pp. 522-530, 1996.

(9) 김태용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류 감시를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용", 한국정밀 공학회지, vol. 13, No. 2, pp. 133-145, 1996.

(10) Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," Trans. of the ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 114, Nov., pp. 386-392, 1992.

(11) http://www.lem.com/

(12) Tarng, Y. S. and Cheng, S. T., "Fuzzy Control of Feed Rate in End Milling Operations," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 33, No. 4, pp. 643-650, 1993.

(13) Hsu, P. L. and Fann, W. R., "Fuzzy Adaptive Control of Machining Processes with a Self-Learning Algorithm," Trans. of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, Nov., pp. 522-530, 1996.