

슬라이딩 모드 제어를 이용한 밀링공정의 절삭력 제어

이용석* · 고정한** · 이상조†
 (2000년 6월 15일 접수, 2001년 6월 14일 심사완료)

Cutting Force Regulation in Milling Process Using Sliding Mode Control

Yong Seok Lee, Jeong Han Ko and Sang Jo Lee

Key Words: Productivity(생산성), Milling Process(밀링공정), Cutting Force Regulation(절삭력 제어), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Indirect Cutting Force Measuring(절삭력 간접측정), Current signal(전류 신호)

Abstract

Recent noticeable advances of CNC machine tools have considerably improved productivity and precision in manufacturing processes. However, in the respect of productivity some defects still remain because selection of machining conditions entirely depends on the experiences of programmers. Usually, machining conditions such as feed rate and spindle speed have been selected conservatively by considering the worst cases, and it has brought the loss of machining efficiency. Thus, the improvement of cutting force controller has been done to regulate cutting force constantly and to maximize feedrate simultaneously in case that machining conditions change variously. In this study, sliding mode control with boundary layer is applied to milling process for cutting force regulation and in a commercial CNC machining center data transfer between PC and PMC (programmable machine controller) of CNC machine is done using a standard interface method. And in the cutting force measurement, an indirect cutting force measuring system using current signal of AC servo is adopted in order not to use high-priced equipment like tool dynamometer. The purpose of this study is to maximize the productivity in milling process, thus its results can be applied to cases such as rough cutting process.

기호설명

v_c : 지령 이송속도
 v_a : 실제 이송속도
 τ_s : CNC 서보계의 시상수
 τ_{cf} : 절삭공정의 시상수

K_{cf} : 절삭공정계인
 d : 축방향 절입 깊이
 k_{cf}' : 재료상수
 N : 주축회전속도
 Z : 엔드밀의 날수
 K_s : 주축 및 공구강성
 F_{fa} : 실제 절삭력
 F_r : 기준 절삭력
 K : 슬라이딩 모드 제어기 게인
 λ : 슬라이딩 평면 구조체의 차단주파수
 η : 슬라이딩 모드 제어기의 시상수
 \emptyset : 경계층의 두께

* 신도리코(주) 기술연구소
 ** 연세대학교 대학원
 † 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
 E-mail : sjlee@yonsei.ac.kr
 TEL : (02)2123-2818 FAX : (02)364-6769

1. 서론

CNC 공작기계의 급속한 발전과 보급은 생산성 및 정밀도에 대한 신뢰성의 향상과 함께 더 이상 속련공을 요구하지 않음으로써 가공비용의 절감을 아울러 가져왔다. 반면 CNC 공작기계는 NC code에 의해 작동되므로 속련된 프로그래머를 요구하고 이 때 프로그래머는 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수 등의 여러 조건들을 가공전에 다분히 경험치에 의존하여 결정하게 된다. 여기서 가공이 내포한 여러 불확실한 요인과 가공조건 수 많은 조합으로 인해 최적의 절삭조건을 찾아내는 일은 매우 어려운 일이며 따라서 프로그래머는 항상 최악의 상황을 예상하여 여유 있는 가공조건을 선점함으로써 결과적으로 공작기계가 지닌 최대의 출력을 다 사용할 수 없게 되어 생산성 측면에서의 손실요인을 남긴다.

따라서 이러한 문제들의 해결을 위한 노력들이 정해진 절삭력을 유지하는 조건 내에서 절삭이송을 극대화함으로써 가공시간을 단축하고 아울러 생산성을 극대화하는, 이른바 구속 적응제어(ACC, Adaptive Control with Constraint)에 대한 연구를 중심으로 진행되어 왔다.^(1~4,7,9)

Fig. 1에서는 일정한 이송속도가 주어지는 기존의 가공과 적응제어의 개념에 따라 이송속도가 변화하는 경우의 가공을 비교하고 있다.

그림에서 예로 든 세 가지의 절삭깊이를 가지는 공작물의 가공시, 기존의 개념에서는 절입깊이가 최대인 마지막 단계를 기준으로 이송속도를

결정하므로 상대적으로 절입깊이가 작은 앞의 두 구간에서는 이송속도가 작게 설정된 셈이 된다. 반면 절삭력 적응제어를 적용한 경우 가공전 최대허용 절삭력을 설정하고 이에 맞추어 이송속도를 가공 중에 온라인으로 조절함으로써 결과적으로 가공시간을 단축하고 아울러 이에 따른 생산성 향상의 효과를 얻을 수 있다.

이러한 적응제어 기법에 대한 연구들로는 Fussell과 Srinivasan⁽⁴⁾이 현대적인 제어공학 관점에서 가공조건 변화가 큰 경우 적응제어 이론을 적용하여 가공조건 중 파라미터를 변화시키는 것이 종래의 고정된 계인을 가지는 제어기의 문제점을 해결할 수 있음을 제기하였고 이후 Lauderbaugh와 Ulsoy⁽⁷⁾ 엔드밀 가공에서 고정된 계인을 가지는 제어기의 성능이 가공조건 급격한 변화에 의해 불안정해질 수 있음을 보이고 MRAC(model reference adaptive control) 이론을 적용하여 절삭력 추종제어를 적용, 기존의 많은 문제점을 개선하였으나 몇가지 요인들에 의해 시스템이 불안정해지는 등의 문제점을 남겼다. 또한 Elbestawi^(1,2) 등은 밀링공정에 대해 여러 가지 적응제어 이론을 적용하여 성능비교를 하였으며 결과 PID 적응제어기가 계단형으로 절삭깊이가 변하는 경우 가장 우수한 성능을 보인다고 하였으나 변화순간의 과도응답 측면에서 그리 만족할만한 성능을 보여주지 못했다. 한편 Lauderbaugh와 Ulsoy는 밀링시스템에서의 고정된 계인을 가지는 제어기의 한계성에 대해 언급하며 해결책으로 적응제어기(adaptive controller)와 강인제어기(robust controller)를 제시하였다.

강인제어기인 슬라이딩 모드 제어기는 절삭공정의 모델링 과정에서 발생하는 불확실성이나 모델링되지 않은 동역학이 존재하는 경우 등에 효과적이며 시스템의 안정성 및 성능의 유지측면에서도 장점을 가지고 있다. 또한 이 제어기는 시스템의 과도응답특성 면에서 우수성을 보이며 모델변수의 변화 및 외란에 대해서도 강인하게 반응하여 단차가공과 같이 환경이 급격하게 변하는 경우에 안정성 측면에서 기타 제어기에 대한 비교우위를 갖고있다.

한편 이와 관련하여 Chang과 Chen은 슬라이딩 모드 제어의 토대가 되는 가변구조계(VSS, variable structure system) 이론에 기반을 두고 큰 배치 방식의 견실한 제어기법을 제안하여 선삭공

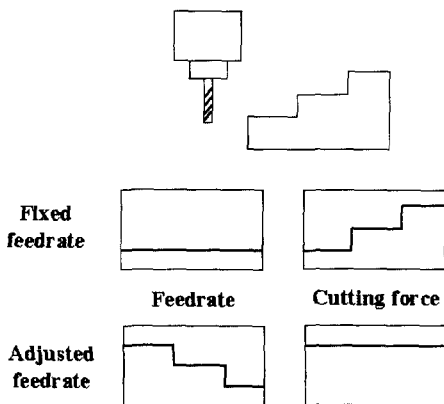


Fig. 1 Concept of feedrate maximization

정에 대해 시뮬레이션 및 실험으로 안정성을 증명하였으며⁽¹²⁾ 또한 Park은 선삭공정에 Slotine의 경계층 이론⁽¹¹⁾을 도입한 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 일정한 절삭력을 유지하는 가공에 만족스러운 결과를 얻을 수 있음을 보였다.⁽¹⁰⁾ 아직까지 밀링공정에 대해서는 어떠한 방식으로든 슬라이딩 모드 제어가 적용된 사례가 없으며 따라서 본 연구에서는 밀링공정에 대하여 슬라이딩 모드 제어기를 설계하고 시뮬레이션과 적용실험을 수행하였다.

한편 이러한 적응제어가 이루어지기 위해서는 실시간 절삭력 감시가 뒷받침되어야 하고 여기엔 공구동력계가 가장 일반적으로 사용되지만 실용화에 있어선 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 이에 본 연구는 이를 대체하는 여러 가지 센서들 중 가장 대표적인 전류센서를 사용하여 구동모터의 전류신호를 통해 절삭력을 간접적으로 추정하고 이를 바탕으로 보다 실용화에 용이한 절삭력 제어 시스템을 구축하는 것을 목적으로 하였다.

2. 시스템의 모델링

폐회로되먹임제어계는 크게 controller 부와 plant 부로 나눌 수 있으며 본 논문의 제어대상이 되는 plant 부는 다시 다음 그림과 같이 CNC 이송 서보계와 절삭공정으로 나누어 생각할 수 있다. 참고로 본 논문에서 선정한 공작기계는 통일중공업의 TNV-40A 머시닝센터이다.

먼저 CNC servosystem은 CNC와 machine tool의 servosystem간의 조합으로 구성되며 일반적으로 servosystem은 2차계로 modeling 되지만 한정된 범위내에서 이송 서보계는 속도제어부의 시상수만을 고려하여 다음의 1차 시스템으로 모델링한다.

$$H_s(s) = \frac{v_a(s)}{v_c(s)} = \frac{1}{1 + \tau_s s} \quad (1)$$

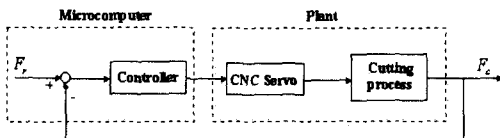


Fig. 2 Force feedback control system

여기서 $v_c(s)$ 는 이송속도 지령[mm/sec] 이고 $v_a(s)$ 는 실제 테이블이송속도[mm/sec], 그리고 τ_s 는 속도제어부의 시상수[sec] 이다. τ_s 는 실험을 통해 결정할 수 있는 값으로서 후에 다시 언급하도록 한다.

다음으로 밀링 절삭공정은 실제 테이블이송속도와 절삭력간의 관계로 표현되어 다음과 같은 1차식으로 가정하도록 한다.

$$H_c(s) = \frac{F_{fa}(s)}{v_a(s)} = \frac{K_{cf}d}{1 + \tau_{cf}s} \quad (2)$$

여기서 K_{cf} 는 절삭공정 계인[N·sec/mm²], d 는 주축방향 절입깊이[mm], τ_{cf} 는 절삭공정의 시상수[sec] 이고 식 (2)에서 K_{cf} 와 τ_{cf} 는 다시 다음과 같이 나타내어진다.

$$K_{cf} = \frac{k_{cf}'}{NZ} \quad (3)$$

$$\tau_{cf} = \frac{k_{cf}'d}{K_s NZ} \quad (4)$$

또한 여기서 k_{cf}' 는 소재 재질에 따른 비례상수 [N/mm²], N 은 주축회전속도[rev/sec], Z 는 엔드밀의 날수, K_s 는 주축 및 공구강성[N/mm] 이다.

따라서 식 (1)과 (2)에 의해 제어대상계는 2차 모델로서 다음과 같이 구성된다.

$$H_p(s) = H_s(s) \cdot H_c(s) = \frac{F_{fa}(s)}{v_c(s)} = \frac{K_{cf}d}{(1 + \tau_s s)(1 + \tau_{cf} s)} \quad (5)$$

3. 제어기의 설계

제어하려는 대상계에 대해 파라미터의 변동이나 외란에 대한 정확한 정보를 가지고 있지 못한 경우에도 다만 그 경계범위를 알고 있다면 강인한 제어가 가능한 것이 슬라이딩 모드제어의 강점이다. 따라서 불확실한 변수의 추정에 대한 필요성이 사라져 제어기 설계가 간단하다는 이점 또한 가지고 있다.

하지만 기존의 슬라이딩 모드 제어는 오차가

재료가 되는 슬라이딩 평면으로의 불완전한 스위칭에 의해 필연적으로 채터링이 발생하는 것으로 알려져 있다. 채터링은 과도한 제어입력을 수반하거나 모델링 과정에서 누락된 동역학에 의한 공진을 야기하는 등의 문제를 일으켜 결과적으로 슬라이딩 모드 제어는 실제의 플랜트에는 적용될 수 없는 단점을 가지고 있었다. 이러한 문제의 해결책으로 slotine은 경계층(boundary layer)의 도입에 의거, 불연속적인 스위칭을 연속적으로 근사화할 것을 제안하였다.⁽¹²⁾ 그 결과 약간의 오차의 증가가 생기는 대신 채터링문제를 효과적으로 해결하였으며 이에 본 논문에서는 경계층을 포함하는 슬라이딩 모드 제어를 설계하여 대상계에 적용해 보도록 한다.

앞서 제시했던 식 (1)과 (2)로부터 식 (6)과 (7)이 얻어지며 이 두 식을 결합하여 다음과 같이 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\dot{v}_a(t) = -\frac{1}{\tau_s} v_a(t) + \frac{1}{\tau_s} v_c(t) \tag{6}$$

$$F'_{fa}(t) = -\frac{1}{\tau_{cf}} F_{fa}(t) + \frac{K_{cf}d}{\tau_{cf}} v_a(t) \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \ddot{F}'_{fa}(t) &= -\frac{1}{\tau_s \tau_{cf}} F_{fa}(t) - \frac{\tau_s + \tau_{cf}}{\tau_s \tau_{cf}} \dot{F}'_{fa}(t) + \frac{K_{cf}d}{\tau_s \tau_{cf}} \dot{v}_c(t) \\ &= a_1 F_{fa}(t) + a_2 \dot{F}'_{fa}(t) + b(t) v_c(t) \\ &= f(F_{fa}(t), \dot{F}'_{fa}(t)) + b(t)u(t) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 앞서 살펴보았듯이 기타 가공조건 및 강성, 재료상수 등이 고정되어 있더라도 시간에 따라 절입깊이가 변하는 경우 절삭공정의 시상수 역시 시간에 따라 불규칙적으로 변화하는 변수가 되어 식 (8)의 계수 a_1 , a_2 , b 는 모두 시간에 따른 변수가 된다. 그러나 최소 절삭 깊이와 최대 절삭깊이의 범위를 알고 있다면 추정변수 \hat{a}_1 , \hat{a}_2 , \hat{b} 을 사용하여 시스템을 다시 표현할 수 있다.

이제 기준 절삭력의 추종오차와 슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.

$$e = F_{fa} - F_r \tag{9}$$

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) e = \dot{e} + \lambda e \quad (\lambda > 0) \tag{10}$$

다음으로 sliding condition의 정의로부터

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 = s\dot{s} = s(f + \delta v_c + \lambda F'_{fa}) \leq -\eta |s| \quad (\eta > 0 : \text{constant}) \tag{11}$$

$$v_c = \delta^{-1} (-f - \lambda F'_{fa} - K \text{sgn}(s)) \tag{12}$$

여기서 앞서 언급한 추정변수 δ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta = (b_{\min} b_{\max})^{1/2}, \quad \beta = \left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right)^{1/2} \tag{13}$$

다음으로 K 는 sliding condition 으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$K = |\beta - 1| |f + \lambda F'_{fa}| + \beta \eta \tag{14}$$

하지만 앞서도 언급했듯이 sgn 함수의 사용으로 인해 제어입력의 채터링 현상이 발생하며 이것의 방지를 위해 경계층을 도입하여 controller를 sgn 함수 대신 sat 함수를 사용하여 수정한다.

$$v_c = \delta^{-1} [-f - \lambda F'_{fa} - K \text{sat}(s)] \tag{15}$$

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} s/\phi & : \text{if } |s/\phi| \leq 1 \\ \text{sgn}(s/\phi) & : \text{otherwise} \end{cases} \tag{16}$$

여기서 ϕ 는 경계층의 두께를 나타내며 이 영역외에서는 이전과 같은 빠른 접근성을, 그리고 영역내에서는 접근속도를 줄여 슬라이딩 평면으로의 부드러운 추종성을 보장한다.

4. 모델링 변수의 결정

앞서 소개한 시스템의 모델링 중에는 실험을 통해 결정되어야 할 실제 플랜트 및 가공환경에 대한 몇가지 파라미터들이 포함되어 있다. 다음에는 실제 제어 적용 대상계인 TNV-40A의 CNC 서보 시상수 및 SM45C의 재료상수의 측정에 대해 나타내고 있다.

4.1 CNC 서보 시상수 (τ_s)의 측정

Fig. 3은 CNC 서보계의 시상수를 측정하기 위한 실험장치의 개략을 보여주고 있다. 사전에 미

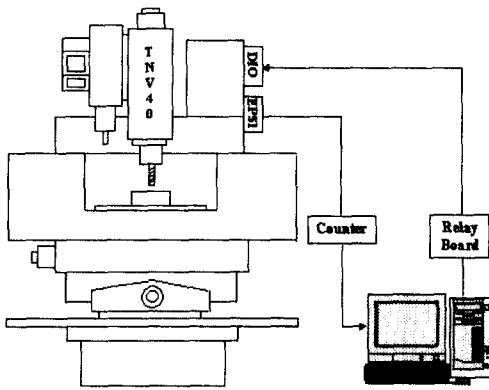


Fig. 3 Schema of experimental setup

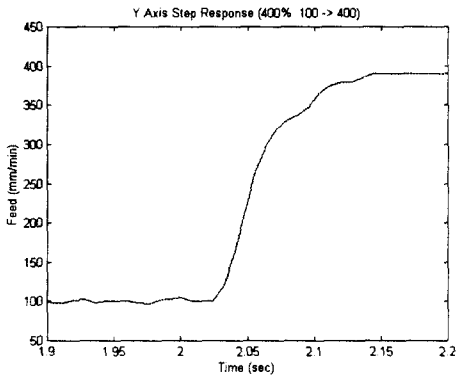


Fig. 4 Step response of feed drive system

리 구축해 놓은 CNC의 PMC (programmable machine controller)를 통한 표준 접속방법을 사용하였으며 초기 이송에 대해 정해진 시점에 2배, 4배, 8배로 증가지령을 내리고 이때의 실제의 테이블이송속도를 엔코더 신호로 받아 지령이송속도와 실제이송속도와의 관계를 확인하였다. 참고로 본 논문의 대상계인 TNV-40A는 8 bit의 표준 접속단자를 가지고 있어 총 256단계의 feedrate override 신호를 전달할 수 있도록 되어있다.

측정결과와 한 예를 Fig. 4에 도시하였다. 초기 이송 100 mm/min 이며 시간이 2 sec 일 때 4배, 즉 400 mm/min 의 지령을 주었다. 대략 0.03 sec 정도의 시간지연이 보이며 지령전달 후 목표이송속도의 63.2 %가 되기까지의 시간을 시상수로 보아 약 0.06 sec 정도의 시상수를 얻을 수 있다.

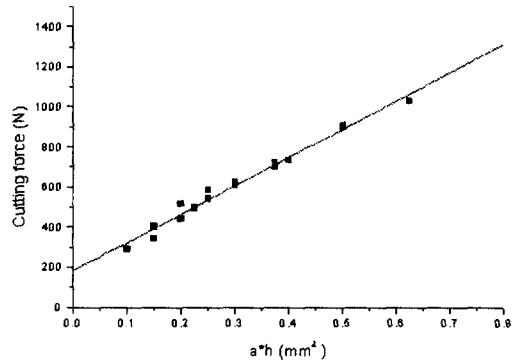


Fig. 5 Decision of material constant

다음장의 시뮬레이션에 사용된 시상수는 여러번의 반복실험들의 결과를 평균한 값이다.

4.2 재료상수 (k_{cf}')의 측정

절삭공정에 대한 모델링 식 (2)으로부터 정상상태를 고려하면 다음 식이 유도된다.

$$F_{fa} = k_{cf}' d h_{max} \tag{17}$$

여기서 h_{max} 는 최대 날당 이송량으로서 식 (17)은 절삭력이 재료상수와 절삭면적과의 곱으로 표현될 수 있음을 나타낸다. 따라서 재료상수 k_{cf}' 를 결정하기 위해 절삭깊이와 이송속도를 변경시켜 여러 가지 조합의 절삭조건에 대해서 실험하였고 각각의 조건에 대해 최대 절삭력과 최대절삭면적을 연관시켜 도성한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 명확한 선형관계가 나타나며 이때의 기울기가 곧 재료상수에 해당한다.

5. 절삭력 간접측정 시스템

이송속도 제어를 통한 절삭력 제어를 밀링공정에 적용하는데 있어 중요한 선결조건의 하나가 가공 중에 실시간으로 절삭력을 측정하는 문제이다. 절삭력의 측정을 위한 장비로서 가장 널리 알려진 것은 공구동력계지만 실용화 측면에 있어 여러 가지 문제점으로 인해 본 연구에서는 이를 배제하고 대신 전류센서를 통해 이송모터의 전류 신호로부터 절삭력을 간접적으로 측정하였다.

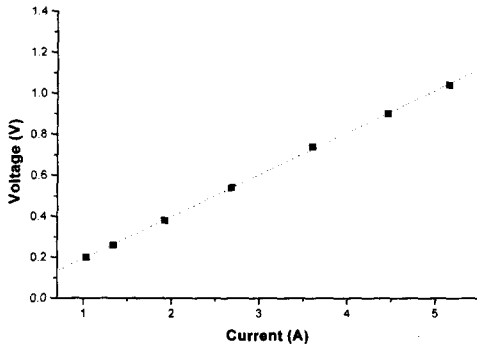


Fig. 6 Relation of current sensor between input and output signal

따라서 다음에서는 절삭력 측정시스템이 갖추어야 할 조건으로 측정값의 정확도와 민감도, 그리고 측정시스템의 대역폭에 대한 고려가 이루어졌다.

5.1 전류센서의 선형성

사용된 전류센서는 전류가 흐르는 도선주위에 발생하는 자기장의 세기를 감지하여 그에 비례하는 전압신호를 출력으로 발생시키는 홀소자를 이용한 것으로서 절삭력 측정장치로 사용하기에 앞서 먼저 사용하고자 하는 범위에서의 선형성을 보장해 줄 필요가 있다. 이를 위해 함수발생기와 자체 제작한 앰프를 사용하여 전류센서에 대략 1에서 5A 사이의 전류를 흐르게 하고 이때의 전류센서의 출력전압값을 받아 입출력신호의 선형성을 검증하였다. 측정실험결과를 Fig. 6에 나타낸 바와 같고 대략 입력 5A에 1V의 출력을 나타내었다.

5.2 절삭력 간접측정 시스템의 대역폭

절삭력 간접측정 시스템은 가공시 절삭력을 입력으로, 그에 따른 전류신호를 출력으로 가지는 시스템으로서 그 대역폭은 같은 절삭면적을 가지는 조건하에서 이물림 주파수를 바꾸어 가며 측정된 절삭력과 전류신호와의 관계를 통해 결정할 수 있다. Fig. 7은 이 같은 방법으로 측정된 전류신호와 절삭력의 비 및 이물림 주파수간의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 7로부터 이 시스템의 대역폭은 약 60 Hz 정도인 것을 알 수 있으며 이는 일반적인 엔드밀

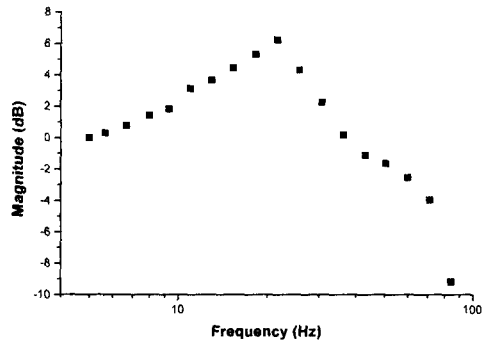


Fig. 7 Bandwidth of indirect cutting force measure system

황삭 가공시의 적절한 가공조건에서의 이물림 주파수를 감안했을 때 충분한 크기라고 볼 수 있다.

5.3 전류신호와 절삭력 간의 관계

가공시의 절삭력은 이송모터에 외란의 형태로 작용하여 이에 대한 이송모터서보의 반응을 유발함으로써 결과적으로 이송모터전류의 변화가 나타난다. 따라서 이러한 관계를 이용하여 이송모터의 전류신호로부터 실제 절삭력을 추정할 수 있다. TNV-40A 머시닝 센터의 이송축 모터는 영구자석 동기형의 3상 교류모터로서 u, v, w의 세 가지 상의 전류가 다음과 같이 120도의 위상차를 갖고 발생되며 이의 표현은 관련된 논문을 참조하기 바란다.⁽⁹⁾

그리고 사인함수 형태로 표현되는 3상의 전류신호는 다시 실용화 측면에서 rms 값으로 환산하여 사용한다.^(13,14)

한편 관련연구⁽⁹⁾로부터 절삭력과 이송모터 전류는 선형적 관계를 가지고 있음이 알려진 바 있으며 따라서 이 같은 절삭력과 이송모터의 전류신호 사이의 선형성을 확인하고 그 관계로부터 절삭력을 예측하기 위한 실험을 수행하였다. 실험은 여러 가지 절삭깊이, 이송속도, 공구직경 등 다양한 조건에 대해 이루어졌으며 각각의 조건에 대해 측정된 절삭력 중 이송분력과 이송모터 전류신호의 최대값과의 관계들로부터 Fig. 8과 같이 선형관계 그래프를 산출하였다. 알려진 바와 같이 절삭력과 전류신호간의 선형성을 확인할 수 있었으며 이로부터 최소자승법에 의해 산출한 이

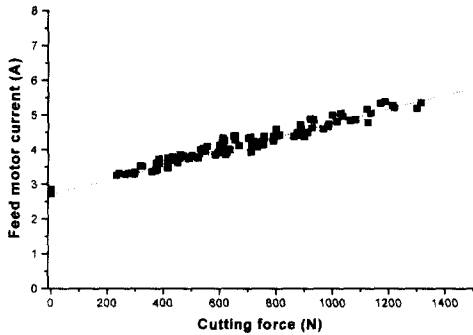


Fig. 8 Relation between cutting force and current of feed motor

송분력과 이송모터 전류사이의 관계식은 식 (18)과 같다.

$$I_{rms} = 2.706 + 0.00205 F_c \quad (18)$$

다음으로 식 (18)에 대한 검증실험을 아울러 수행하였다. 검증은 임의의 절삭조건을 선정하여 절삭실험을 수행한 뒤 측정된 전류값으로부터 식 (18)에 의해 환산한 절삭력과 공구동력계로 측정된 절삭력을 비교하는 방식을 취했으며 Fig. 9에 그 중 한가지 결과를 나타내었다.

검증실험 결과 이송모터 전류로부터 예측한 절삭력은 실제 절삭력과 대략 10% 이하의 비교적 미소한 오차량을 보였다.

6. 절삭력 제어 실험

6.1 실험장치의 구성

전체 실험장치는 크게 실제 절삭력을 간접적으로 측정하기 위한 부분과 측정된 절삭력에 대해 지령이송을 계산하는 부분, 그리고 지령이송치를 CNC에 전달하기 위한 부분 등으로 나누어 볼 수 있으며 이 모든 장치는 실용화 측면을 염두에 둔 것이다. Fig. 10에 전체 실험장치의 구성을 나타내었고 Fig. 11은 사용된 실험장비이다.

6.2 절삭력 추종제어 실험결과

슬라이딩 모드 제어기의 절삭력 제어 성능을 확인하기 위해 실제 밀링공정에 대해 일정한 절

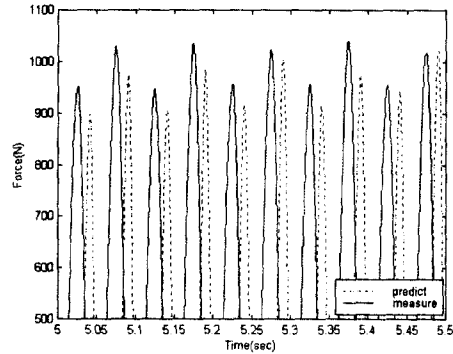


Fig. 9 Verification of calibration

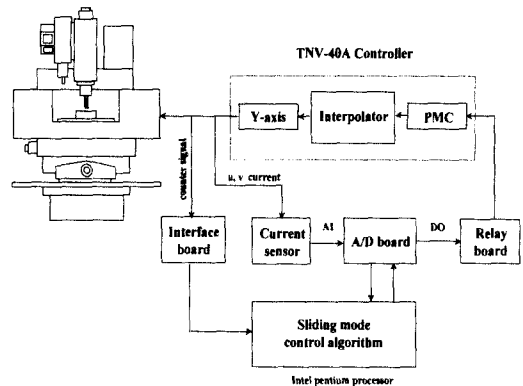


Fig. 10 Schematic diagram of entire experimental setup

삭력을 추종제어하는 실험을 수행하였다. 다시말해 Y축 한 방향의 이송에 대해 이송분력의 최대값이 기준 절삭력을 추종하도록 하였다. 공구는 앞서 강성측정 시 사용했던 TiN이 코팅 처리된 고속도강 재질의 2날 엔드밀이며 직경 16 mm와 20 mm를 사용하였다. 가공물의 재질 역시 재료 상수의 측정에 사용했던 SM45C 강이다.

6.2.1 단차가공 (1)

먼저 절입깊이가 계단형으로 2 mm에서 3 mm로, 다시 3 mm에서 4 mm로 두 차례 변화하는 경우에 대한 실험을 진행하였다. 자세한 실험조건 및 제어기 파라미터는 Table 1에 나타낸 것과 같고 이 실험에 대한 결과는 Fig. 12에 도시하였다. 제어기의 동작 여부를 확인하기 위해 제어기는 가공이 시작되고 부터 2 sec가 경과한 이후부

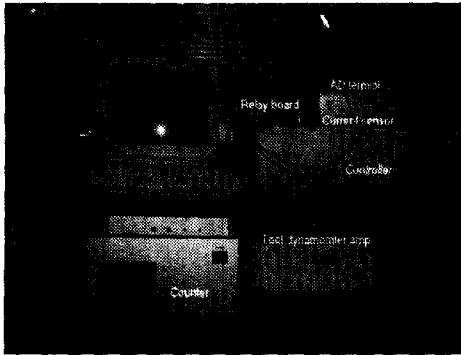


Fig. 11 overview of equipments

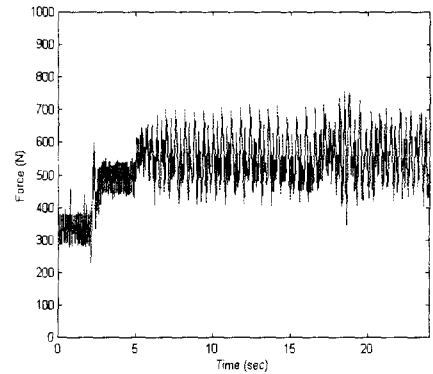
Table 1 Cutting condition for experiment - case I

Tool	16 mm dia. HSS endmill 2 flute
Workpiece	SM45C steel
Cutting depth	2 → 3 → 4 mm (step)
Spindle speed	600 rpm
Initial feed	100 mm/min
Reference cutting force	550 N
Control parameter	$\lambda = 20$, $\eta = 0.1$, $\Phi = 3000$

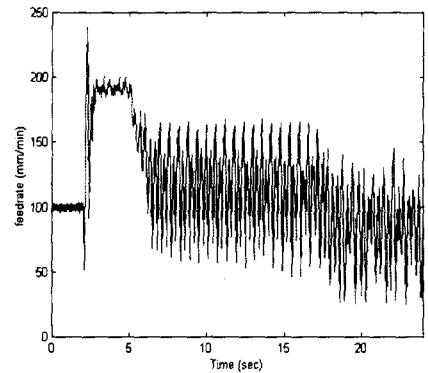
터 동작하도록 하였다. 대략 가공시작 후 5 sec, 17sec 경과한 지점에서 절입깊이가 변화하면서 약간의 절삭력의 변동이 나타나지만 곧 사전에 설정된 경계층 이내로 절삭력이 추종제어되고 있음을 확인할 수 있었고 또한 절입깊이가 증가함에 따라 기준절삭력으로의 추종을 위해 이송속도가 감소하는 모습도 확인할 수 있다.

6.2.2 단차가공 (2)

다음 경우로서 절입깊이가 계단형으로 2 mm에서 3 mm로 증가하다가 다시 3 mm에서 2 mm로 감소하는 경우에 대해 실험하였다. 직경 16 mm의 두 날 엔드밀을 사용하였으며 자세한 실험조건 및 제어기 파라미터는 Table 2에 나타내었고 이 실험에 대한 결과는 Fig. 13과 같다. 앞서의 실험결과와 마찬가지로 절삭력이 경계층 이내로 추종되고 있다. 즉, 제어기는 절입깊이의 증가에 대해 이송속도를 감소시켰다가 절입깊이가 다시 감소하면 이송속도를 증가시켜 기준절삭력 범위를 유지하는 것을 확인할 수 있다.



(a) Cutting force



(b) Actual feedrate

Fig. 12 Results of experiment - case I

6.2.3 경사면가공

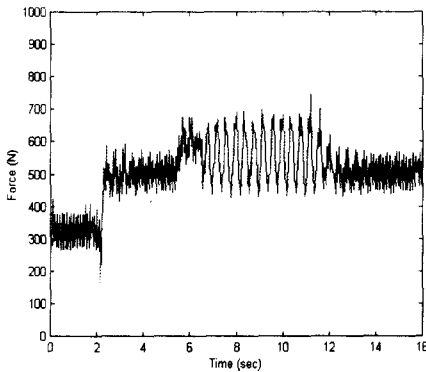
다음으로 절입깊이가 2 mm에서 4 mm로 선형적으로 증가하는 경사시편을 가공하였다. 자세한 실험조건 및 제어기 파라미터는 Table 3과 같으며 그 결과는 Fig. 14에 나타내었다. 약 5 sec부터 12 sec 사이에서 절입깊이가 증가하고 있으며 선형적으로 절입깊이가 증가함에 따라 이송속도도 서서히 감소하는 모습을 확인할 수 있고 절삭력의 경우 절입깊이의 증가에 따라 절삭력의 변동폭이 증가하지만 경계층 내에서 추종제어되고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Cutting condition for experiment - case II

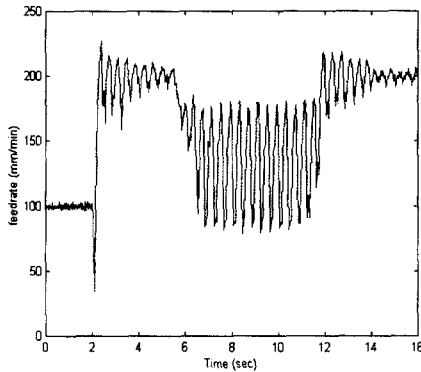
Tool	16 mm dia. HSS endmill 2 flute
Workpiece	SM45C steel
Cutting depth	2 → 3 → 2 mm (step)
Spindle speed	600 rpm
Initial feed	100 mm/min
Reference cutting force	560 N
Control parameter	$\lambda = 20$, $\eta = 0.1$, $\Phi = 3000$

Table 3 Cutting condition for experiment - case III

Tool	20 mm dia. HSS endmill 2 flute
Workpiece	SM45C steel
Cutting depth	2 → 4 mm (slope)
Spindle speed	480 rpm
Initial feed	80 mm/min
Reference cutting force	650 N
Control parameter	$\lambda = 20$, $\eta = 0.1$, $\Phi = 3000$

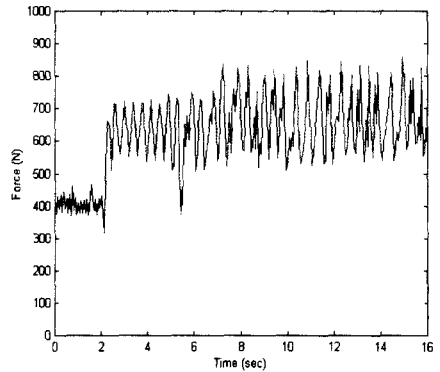


(a) Cutting force

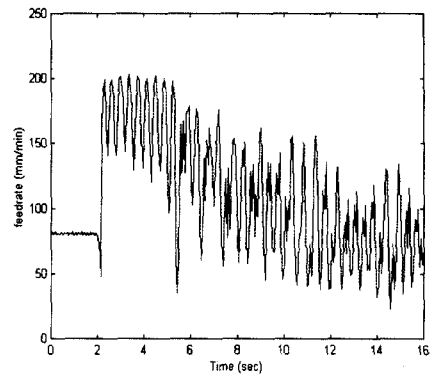


(b) Actual feedrate

Fig. 13 Results of experiment - case II



(a) Cutting force



(b) Actual feedrate

Fig. 14 Results of experiment - case III

7. 결론

본 논문에서는 실용화를 고려한 절삭력 제어 시스템의 개발을 위해 전류센서를 이용한 이송모터의 전류감시를 통한 간접적인 절삭력 측정이 이루어졌다. 또한 모델링 상의 불확실성이나 가공중의 외란, 그리고 과도응답 측면에서 많은 장점을 가진 것으로 알려져 있는 슬라이딩 모드 제

어를 도입하여 강인한 제어를 설계하였다.

이를 다시 정리해보면

(1) CNC의 이송서보계와 밀링 절삭공정을 모델링하였고 이를 바탕으로 절삭력 되먹임 제어계를 설계하였다. 또한 선행실험을 통해 모델링상의 매개변수들을 측정하여 시뮬레이션 및 절삭력 제어 실험에 적용하였다.

(2) 밀링공정에 다양한 가공조건변동의 고려

하여 경계층을 갖는, 강인한 슬라이딩 모드 제어기를 설계, 적용하였으며 시뮬레이션 및 실제 제어실험을 통해 슬라이딩 모드 제어기가 다양한 가공형상 및 공구직경 등 가공조건에 변동에 대한 밀링공정의 절삭력제어에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 본 연구의 취지중 하나인 실용화 가능한 시스템의 구성을 위해 고가 장비의 사용을 배제하고 전류센서를 사용한 간접적인 절삭력 측정방식을 도입, 그 성능을 검증하였으며 이를 이용하여 절삭력제어를 수행하였다.

참고문헌

- (1) Elbestawi, M. A., Mohamed, Y. and Liu, L., 1990, "Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 611~617.
- (2) Elbestawi, M. A. and Sagherian, R., 1987, "Parameter Adaptive Control in Peripheral Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 27, No. 3, pp. 399~414.
- (3) Rober, S. J. and Shin, Y. C., 1996, "Control of Cutting Force for End Milling Processes Using an Extended Model Reference Adaptive Control Scheme," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 339~347.
- (4) Fussell, B. K. and Srinivasan, K., 1991, "Adaptive Control of Force in End Milling Operations - An Evaluation of Available Algorithms," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 8~20.
- (5) Altintas, Y., 1992, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, pp. 386~392.
- (6) Fussell, B. K. and Srinivasan, K., 1989, "On-Line Identification of End Milling Process Parameters," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 322~330.
- (7) Lauderbaugh, L. K. and Ulsoy, A. G., 1989, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 13~21.
- (8) Kline, W. A., Devor, R. E. and Lindberg, J. R., 1981, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22.
- (9) 김태용, 1995, "건설한 적응제어기를 이용한 절삭력 제어에 관한 연구," 서울대학교 공학박사학위논문.
- (10) Park, Y. B., Kim, T. Y. and Kim, J.W., 1998, "Sliding mode cutting force regulator for turning process," *International Journal of Machine tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 911~930.
- (11) Slotine, J. J. and Li, W., 1991, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall.
- (12) Chang, Y. F. and Chen, B. S., 1988, "The VSS Controller Design and Implementation for The Constant Turning Force Adaptive Control System," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 28, No. 4, pp. 373~387.
- (13) 김승철, 정성중, 1998, "밀링공정에서 이송모터와 주축모터를 이용한 절삭력 추정," 대한기계학회논문집, 제22권, 제11호, pp. 2029~2038.
- (14) 이상조, 남원우, 고정한, 이기택, 1998, 공작기계 모니터링 기술개발 보고서, 기아중공업, pp. 15~18.